



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências da Terra

**Estudo da evolução da linha de costa entre o cabo
Mondego e Aveiro (1958 - 2010)**

Gabriel Moreira Menezes

MESTRADO EM CIÊNCIAS DA TERRA

Julho, 2011



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências da Terra

**Estudo da evolução da linha de costa entre o cabo
Mondego e Aveiro (1958 - 2010)**

Gabriel Moreira Menezes

Mestrado em Geociências

Ambiente e Ordenamento do Território

Orientadores científicos

Prof. Dr. Pedro Proença Cunha, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra

Dra. Susana Costas, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Unidade de Geologia
Marinha

Julho, 2011

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a evolução da linha de costa na faixa litoral delimitada ao sul pelo cabo Mondego (~50 Km), e ao norte pelos molhes portuários de Aveiro (1200 e 700 m de comprimento). Para tal, recorreu-se a coberturas de fotografia aérea vertical entre os anos 1958 e 2007. Adicionalmente, foi realizada a cartografia de aproximadamente trinta quilómetros de linha de costa (nos dias 6/12/2010 e 4/02/2011) com a utilização de um RTK-GPS equipado a um veículo todo-terreno.

O processo de extração das linhas de costa foi elaborado com base em dois limites interpretados, para o caso, como indicadores da posição da linha de costa: a linha entre a areia seca e a areia molhada, e o contato entre a praia alta e o cordão dunar frontal (limite para o mar da vegetação dunar). É apresentada uma discussão sobre a aplicação mais adequada dos indicadores de linha de costa para o litoral em questão, considerando as respostas espaciais e temporais dos mesmos aos processos que controlam a evolução da linha de costa. As posições de linhas de costa respectivas aos anos das fotografias aéreas (1958, 1970, 1973, 1977, 1995, 1998, 2007) e a cartografia com RTK-GPS foram utilizados para os cálculos das taxas evolutivas entre estes intervalos de tempo, assim como para a análise da evolução a curto e a médio-termo.

Foi possível identificar uma expressiva regressão da linha de costa (aproximadamente -8 m/ano) no segmento mais setentrional da área de estudo (de Aveiro até Praia de Mira), influenciada pela presença dos molhes portuários de Aveiro (construção terminada em 1958). Esta regressão se estende por vinte e cinco quilómetros para sul, demonstrando a deficiência sedimentar deste segmento causada pela retenção no molhe norte dos sedimentos transportados pela deriva litoral para sul. Durante o período de análise, a erosão intensificou-se neste segmento, o que levou a instalação de estruturas de defesa costeira (esporões e enrocamentos), compartimentando a costa em células litorais influenciada por estas estruturas. Já a linha de costa correspondente ao segmento meridional da área de estudo (de Praia de Mira até Quiaios) encontra-se quase estável com uma acreção noticiada nos arredores de Palheiros de Tocha (aproximadamente +3 m/ano). Este segmento apresenta um balanço sedimentar positivo, sem a influência direta dos molhes portuários, o que possibilitou a relatada acreção.

Palavras-chave: Cabo Mondego - Aveiro, fotografia aérea vertical, RTK-GPS, Digital Shoreline Analysis System, evolução da linha de costa.

Abstract

This work investigates the shoreline evolution of the coastal stretch between Cape Mondego, to the south, and the harbor breakwaters (1200 and 700 m length) of the Aveiro inlet to the north. Vertical aerial photographs spanning the time period between 1958 and 2007, and one field survey using a RTK-GPS mounted on an all-terrain vehicle (6/12/2010 and 4/02/2011) were utilized to analyze the evolution of the shoreline.

Shoreline detection was done by using two different features that represent the shoreline position: the wet/dry line and the boundary between the backshore and the foredune (seaward dune vegetation line). The shoreline positions mapped in the aerial photographs (1958, 1970, 1973, 1977, 1995, 1998, and 2007) and surveyed in the field were used to calculate the shoreline rates-of-change in a short and mid-term timeframe. Considering the spatial and temporal response of the shoreline to the coastal processes, it was critical to examine and discuss which would be the most appropriate and applicable shoreline indicator.

The results documented a significant shoreline erosion/regression of around -8 m/year within the northern sector of the study area (from Aveiro to Praia de Mira). This erosion coincides with the construction of breakwaters finished in 1958, which modified the normal north to south longshore sediment transport by trapping sediment in the updrift inlet shoreline. During the time period studied, the coastal erosion rates tended to be more intense, leading to the construction of coastal defense structures (groynes and seawalls) and the subsequent compartmentalization of the shoreline. On the other hand, the southern sector of the study area (from Praia de Mira to Quiaios) remained almost stable. A slight accretionary trend of around +3m/year was detected in the proximities of Palheiros de Tocha. This positive trend suggests that the area of influence of the breakwaters is limited to the northern sector and that to the south the longshore sediment transport maintains a positive sediment budget.

Keywords: Cape Mondego – Aveiro, vertical aerial photograph, RTK-GPS, Digital Shoreline Analysis System, shoreline evolution.

Agradecimentos

Dedico esta secção àqueles que fizeram parte no desenvolvimento deste trabalho e tornaram possível a sua realização. Agradeço a todos pela atenção quando lhes foi pedida ajuda, e pela aposta na minha pessoa e trabalho. Como forma de reconhecimento, deixo aqui minhas palavras a alguns que participaram neste caminho:

- Aos meus orientadores científicos, respectivamente, Prof. Pedro Proença Cunha (do IMAR-Centro do Mar e do Ambiente) e Dra. Susana Costas (do LNEG), pelos ensinamentos, apoio e paciência;
- Aos docentes e funcionários do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, bem como aos investigadores do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, em especial aos da Unidade de Geologia Marinha, que me acompanharam ao longo destes últimos dois anos;
- À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento do Projeto “Reconstituição da posição da linha de costa Portuguesa nos últimos 6000 anos – Análise da estrutura e estratigrafia de barreiras arenosas (SCARPS)” (PTDC/CTE-GIX/101466/2008), de que a Dra. Susana Costas é a Investigadora Responsável;
- Ao Instituto Geográfico Português e ao Instituto Geográfico do Exército, por cederem gratuitamente algumas coberturas de fotografia aérea utilizadas neste estudo (anos 1970, 1973, 1977, 1995, 1998, 2007);
- À Administração Regional Hidrográfica do Centro por autorizar os trabalhos de campo realizados no litoral de estudo;
- Ao Departamento de Ciências da Terra da Univ. Coimbra por ter dado apoio financeiro à impressão dos volumes da Dissertação;
- Àqueles meus compatriotas e amigos por terem compreendido minha ausência e sempre me apoiado neste investimento profissional;
- Ao meu Pai, à minha mãe, à minha família. O meu ser celebra alegre quando pensa em vocês. Vivo em constante felicidade porque os tenho comigo.

Índice

Capítulo I - Introdução	1
1.1 Introdução teórica	2
1.1.1 O ambiente litoral	2
1.1.2 Definição de linha de costa.....	5
1.1.3 Fatores que interferem na variabilidade da linha de costa.....	5
1.1.4 Delimitação de linhas de costa	7
1.2 Justificativa e objetivos do trabalho.....	14
Capítulo II - Área de estudo	16
2.1 Enquadramento Geográfico	16
2.2 Enquadramento Geológico	16
2.3 Enquadramento Geomorfológico	18
2.3.1 Corpos Lagunares	18
2.3.2 Praias	20
2.3.3 Dunas eólicas.....	23
2.4 Enquadramento climático.....	24
2.5 Marés.....	25
2.6 Clima de agitação marítima	26
2.7 A dinâmica sedimentar litoral	27
2.8 Evolução da linha de costa	28
2.9 Evolução recente da linha de costa	31
Capítulo III - Material e Métodos	34
3.1 Coberturas de fotografias aéreas verticais	34
3.1.1 Fotografias aéreas de 1958 (Voo USAF).....	35
3.1.2 Fotografias aéreas de 1970.....	35
3.1.3 Fotografias aéreas de 1973.....	35
3.1.4 Fotografias aéreas de 1977	36
3.1.5 Ortofotomapas de 1995.....	36

3.1.6 Ortofotomapas de 1998	36
3.1.7 Ortofotomapas de 2007	36
3.2 Rasterização	37
3.3 Georeferenciação	37
3.4 Cartografia da linha de costa	42
3.4.1 Cartografia através da análise de coberturas de fotografias aéreas	44
3.4.2 Cartografia RTK-DGPS (Real-Time Kinematic Global Positioning System)	45
3.5 Cálculos da evolução da linha de costa	47
Capítulo IV - Resultados	49
4.1 Evolução da Linha de Costa entre 1958 e 1970/73	49
4.1.1 Limite Seco-Molhado entre 1958 e 1970/73	49
4.1.2 Limite Praia-Duna entre 1958 e 1970/73	51
4.2 Evolução da Linha de Costa entre 1970/73 e 1995	52
4.2.1 Limite Seco-Molhado entre 1970/73 e 1995	52
4.2.2 Limite praia-duna entre 1970/73 e 1995	54
4.3 Evolução da Linha de Costa entre 1995 e 1998	55
4.3.1 Limite Seco-Molhado entre 1995 e 1998	55
4.3.2 Limite praia-duna entre 1995 e 1998	56
4.4 Evolução da Linha de Costa entre 1998 e 2007	57
4.4.1 Limite Seco-Molhado entre 1998 e 2007	57
4.4.2 Limite praia-duna entre 1998 e 2007	59
4.5 Taxas de Evolução da Linha de Costa – Variabilidade de Médio Termo (1958 a 2007)	60
4.5.1 Variabilidade de Médio Termo (1958 a 2007) - Limite seco-molhado	60
4.5.2 Variabilidade de Médio Termo (1958 a 2007) - Limite praia-duna	61
4.6 Taxas de Evolução da Linha de Costa – Variabilidade Recente (1995 a 2007)	62
4.6.1 Variabilidade Recente (1995 a 2007) - Limite seco-molhado	62
4.6.2 Variabilidade Recente (1995 a 2007) - Limite praia-duna	63
Capítulo V - Discussão	64

5.1 Comparação entre os indicadores de linha de costa utilizados	64
5.1.1 Processos relacionados e escalas temporais de estudo.....	65
5.1.2 A escolha de um indicador	67
5.2 O comportamento evolutivo da linha de costa a sul dos molhes portuários de Aveiro.	68
5.2.1 Evolução da linha de costa entre os anos 1958 - 1970/73.....	68
5.2.2 Evolução da linha de costa entre os anos 1970/73 – 1995.....	69
5.2.3 Evolução da linha de costa entre os anos 1995 – 1998.....	71
5.2.4 Evolução da linha de costa entre os anos 1998 – 2007.....	73
Capítulo VI - Conclusões	77
Referências	79

Índice de figuras

Figura 1: Zonação da praia emersa e submersa, adaptado de Komar (1998).	2
Figura 2: Modelo morfológico de dunas frontais em diferentes estágios de evolução. A progradação e a recessão de uma duna frontal vão depender da evolução da região costeira (estável, erosiva ou acrecionária), resultando em diferentes tipos morfológicos (Hesp. 2002).	4
Figura 3: O princípio da colinearidade entre um objeto no plano real e a imagem no plano da fotografia. Neste caso está representada a relação espacial entre uma linha de costa no plano real e o plano de uma fotografia aérea vertical (Figura adaptada de Thieler & Danforth, 1994).	8
Figura 4: Distorção (<i>angle of tilt</i>) causada pela obliquidade da câmera durante a tomada de uma fotografia aérea vertical, a qual pode causar um desvio da posição de uma linha de costa. Uma variação na altitude do plano de voo também terá influência na relação espacial entre o plano real e o plano da fotografia devido a variações de escala (Crowell <i>et al.</i> , 1991).	9
Figura 5: Distorção causada pela variação de relevo no plano real. Esta distorção está representada na figura pelo desvio da posição real do topo de uma torre. O mesmo pode ocorrer quando há variações altimétricas no relevo (Crowell <i>et al.</i> , 1991).	9
Figura 6: Representação espacial dos indicadores de linha de costa mais utilizados (Adaptado de Boak & Turner, 2005).	11
Figura 7: Tendência da evolução da linha de costa com a aplicação de três diferentes indicadores (HW: nível da maré alta; LW: nível da baixa-mar; Base da duna frontal). A Progradação da linha de costa, segundo os três indicadores utilizados, demonstra suas diferentes respostas evolutivas. O gráfico (a) representa um segmento costeiro sem influência antrópica, onde a evolução foi relacionada com a migração de bancos arenosos. O gráfico (b) está relacionado com um segmento onde houve tal influência, nomeadamente pela construção de uma barragem.	12

Figura 8: Mapa de localização da área de estudo. A área é representada pela faixa litoral entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro (Portugal central). Este segmento, de aproximadamente cinquenta quilómetros de extensão, apresenta frentes urbanas de povoações, e é interrompido por onze esporões. As fotografias aéreas verticais (ortofotografias de 2007, IGP) estão relacionadas com os locais indicados no mapa. A batimetria apresentada é derivada do modelo morfológico INGMAR, realizado pelo LNEG.	17
Figura 9: Cristas das dunas ocorrentes na planície costeira entre Quiaios e Mira (T-Transversas, P-Parabólicas). Entre o campo dunar e a planície de Gandara, destaca-se a presença das lagoas da Vela e da Braça (Danielsen, 2008a).	18
Figura 10: As diferentes posições da barra de Aveiro durante a formação da restinga arenosa (Corrochano e tal., 2007) e a atual configuração da laguna (Ortofotografia de 1995, IGP), com o canal artificial estabilizado pelos molhes portuários de Aveiro (B - Barra de Aveiro; CM - canal de Mira; CN - Costa Nova do Prado; V - Vagueira).....	19
Figura 11: Perfis refletivos e dissipativos típicos da praia de Quiaios, onde ainda é possível verificar a presença de um cordão dunar frontal (Ferreira, 1993).	20
Figura 12: Principais limites morfológicos para a faixa litoral entre o cabo Mondego e Aveiro. A imagem da esquerda representa os limites típicos para a zona meridional, com um contato entre a praia e o cordão dunar frontal bem definido, uma zona aplanada entre este cordão dunar e o limite ocidental do campo dunar interior estabilizado por uma densa floresta de pinha. A imagem da direita representa a faixa litoral da zona setentrional, interrompida por esporões, e com um cordão dunar frontal degradado.....	21
Figura 13: Perfil da praia submersa, onde podem ser encontradas até duas barras submarinas (barra interna e barra externa). Para o mar, ocorre um prisma litoral aplanada e de baixo pendor (Ferreira, 1993).....	22
Figura 14: Frequência média (%) dos tipos de circulação durante o Inverno, Primavera, Verão e Outono, bem como a frequência das circulações Anticiclónicas (A) e Ciclónicas (C) (Lorenzo <i>et al.</i> , 2011).....	25

Figura 15: Modelo das fases evolutivas para a planície costeira entre Quiaios e Palheiros de Tocha desde a transgressão Flandriana. Fases descritas no texto (Adaptado de Danielsen, 2009).....	29
Figura 16: Distribuição dos setores e litofácies de um perfil geológico perpendicular a linha de costa. Este perfil foi realizado com base em geofísica e furos de sondagens na planície costeira entre Quiaios e Palheiros de Tocha (Castilho, 2008).....	30
Figura 17: Segmentos costeiros entre o cabo Mondego e Aveiro abrangidos pelas coberturas de fotografia aérea (1958, 1970, 1973, 1977, 1995, 1998, 2007) e pela cartografia com RTK-GPS equipado em um veículo todo-terreno.	35
Figura 18: A cobertura de fotografia aérea em papel do ano de 1958 foi digitalizada com a utilização de um scanner Mustek, modelo P3600 PRO. Isto possibilitou a manipulação da fotografia, em formato TIFF, e o seguinte processo de georeferenciação.....	37
Figura 19: Um exemplo da atribuição de pontos de controle (cruzes vermelhas) durante o processo de georeferenciação. Neste caso, foram utilizados vinte pontos dispersos por toda a fotografia de 1958 na área de Palheiros de Tocha.....	39
Figura 20: Ajuste espacial da imagem derivado da ordem de transformação polinomial. Quanto maior a ordem de transformação, mais complexo é o ajuste, permitindo uma melhor georeferenciação (ESRI, 2008)	40
Figura 21: Tabela indicando a matriz de transformação de 3ª ordem, o erro residual de cada ponto de controle e o erro residual total (<i>Total RMS Error</i>) para uma fotografia aérea.	40
Figura 22: Exemplo do indicador de linha de costa representado pelo contato (tracejado vermelho) entre a praia alta e a vegetação dunar. Fotografia aérea de 1970 ao fundo (Fonte: IGeoE) de uma área entre Quiaios e Palheiros de Tocha.....	43
Figura 23: Exemplo do indicador de linha de costa representado pelo limite entre a areia seca e a areia molhada (tracejado vermelho). Ao fundo uma fotografia do ano de 1958 (Fonte: LNEG) de uma área ao sul de Palheiros de Tocha.....	44

Figura 24: Contato praia-duna (esquerda) e seco-molhado (direita) cartografados para o estudo da evolução da linha de costa entre o ano 1958 e 2010. Ao fundo, a fotografia de 2007 (Fonte: IGP).....	45
Figura 25: Cobertura da Rede Nacional de Estações Permanentes, um serviço público de geo-posicionamento prestado pelo Instituto Geográfico Português. Esta rede foi utilizada para informação de posicionamento em tempo real para a cartografia da linha de costa realizada em campo com um veículo todo-terreno equipado com um GPS operacionalizado em modo RTK. (Fonte da figura: IGP).....	46
Figura 26: Veículo todo-terreno utilizado para a cartografia da linha de costa (indicador praia-duna) entre Quiaios e Praia do Areão. O retângulo em negro indica o GPS Trimble® R6 equipado ao veículo (Fonte da imagem do GPS: www.trimble.com).....	46
Figura 27: A linha de base e os transectos ortogonais e igualmente espaçados para utilizados pelo DSAS para cálculos da evolução de linha de costa (Figura adaptada de Thieler <i>et al.</i> , 2009).....	47
Figura 28: A linha de base e os transectos ortogonais (700 m de comprimento, espaçamento de 50 m) nos primeiros quilómetros da área de estudo. Ao fundo a Fotografia aérea de 2007 (Fonte: IGP).....	48
Figura 29: Demonstração do ajuste da reta do método de regressão linear simples a um conjunto de posições históricas de linha de costa. O declive da equação indica a taxa de variação da linha de costa (1.34 m/ano) (Thieler <i>et al.</i> , 2009).....	49
Figura 30: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador seco-molhado. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro).	50
Figura 31: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador seco-molhado.	50
Figura 32: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador praia-duna.....	52
Figura 33: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador praia-duna.	52

Figura 34: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1973 e 1973 segundo o indicador seco-molhado.	53
Figura 35: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1973 e 1995 segundo o indicador seco-molhado. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	53
Figura 36: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1973 e 1973 segundo o indicador praia-duna.....	54
Figura 37: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1973 e 1995 segundo o indicador praia-duna. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	54
Figura 38: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador seco-molhado.	55
Figura 39: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador seco-molhado. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	56
Figura 40: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador praia-duna.....	57
Figura 41: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador praia-duna. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	57
Figura 42: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador seco-molhado.	58
Figura 43: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador seco-molhado. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	58
Figura 44: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador praia-duna.....	59

Figura 45: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador praia-duna. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	59
Figura 46: Variabilidade de médio termo (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 2007 segundo o indicador seco-molhado. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa referentes a 1970/73, 1977, 1995, 1998, 2007. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).....	60
Figura 47: Variabilidade de médio termo (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 2007 segundo o indicador praia-duna. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa disponíveis. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	62
Figura 48: Variabilidade recente (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 2007 segundo o indicador seco-molhado. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa referentes a 1995, 1998, 2007. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	63
Figura 49: Variabilidade recente (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 2010 segundo o indicador praia-duna. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa referentes a 1995, 1998, 2007 e 2010. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	64
Figura 50: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 1970/73. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro).	69
Figura 51: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1970/73 e 1995. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro). As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).	71
Figura 52: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova	

do Prado; B: Barra de Aveiro). As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala). 72

Figura 53: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro). As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala). 74

Figura 54: Variabilidade de médio termo (1958-2007) e variabilidade recente (1995-2007) da posição da linha de costa, indicando as diferentes taxas evolutivas (acrecionárias ou erosivas) ao longo da área de estudo. As taxas evolutivas (m/ano) apresentadas são derivadas de uma regressão linear simples entre a posição das linhas de costa disponíveis. Para a evolução de médio termo foram utilizadas as linhas de costa referentes aos anos 1958, 1970/73, 1977, 1995, 1998, 2007 e 2010. As linhas de costa de 1977 e 2010 não abrangem todo o segmento costeiro, mas foram incluídas para o melhor ajuste da reta de regressão linear. As linhas de costa utilizadas para os cálculos das taxas da variabilidade recente são referentes aos anos 1995, 1998, 2007 e 2010. 76

Índice de tabelas

Tabela 1: Causas naturais e fatores associados a evoluções de uma linha de costa. Adaptado de Stive <i>et al.</i> (2002).....	7
Tabela 2: Taxas médias (m/ano) de evolução da linha de costa entre a Barra de Aveiro e o cabo Mondego. Adaptado de Ferreira (1993).	32
Tabela 3: Tendência evolutiva e previsão da evolução da linha de costa (m/ano) entre os anos 1990-2015 após método de regressão linear (modificado de Ferreira, 1993).	32
Tabela 4: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1958, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.....	40
Tabela 5: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1970, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.....	41
Tabela 6: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1973, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.....	41
Tabela 7: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1977, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.....	41
Tabela 8: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1998, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.....	42

Capítulo I – Introdução

A linha de costa é classicamente definida pelo limite entre o ambiente marinho e o ambiente terrestre. Este limite apresenta uma mobilidade espacial e temporal essencialmente controlada pelas condições energéticas impostas pelo mar. A mobilidade de uma linha de costa ao longo do tempo caracteriza a sua evolução, podendo apresentar tendências erosivas, acrecionárias e estáveis. A erosão de praias é um crónico problema, especialmente em praias arenosas expostas, onde geralmente há uma forte pressão antrópica. O conhecimento da evolução de uma linha de costa, para além do estudo ambiental envolvido, ganhou grande enfoque em todo o mundo principalmente pela ameaça que o avanço do mar causava ao desenvolvimento das atividades realizadas pelo homem nas zonas costeiras.

Este presente estudo se insere em uma das vertentes do projeto “Reconstituição da posição da linha de costa Portuguesa nos últimos 6000 anos - Análise da estrutura e estratigrafia de barreiras arenosas (SCARPS)” (PTDC/CTE-GIX/101466/2008), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. É aqui apresentada a evolução da linha de costa do litoral entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro, com base na extração de posições de linhas de costa de coberturas de fotografias aéreas verticais (1958, 1970, 1973, 1995, 1998, 2007) e cartografia realizada em campo com a utilização de um RTK-GPS equipado em um veículo todo terreno. Paralelamente, discute-se a aplicação de indicadores que melhor representem a mobilidade da linha de costa para a área estudada.

O litoral entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro é caracterizado por aproximadamente cinquenta quilómetros de praias arenosas, interrompidas ao norte por estruturas de defesa costeira. Os problemas erosivos deste troço se tornaram significativos após o término da construção dos molhes sul e norte do porto de Aveiro (fim dos anos cinquenta). O recuo da linha de costa a sotamar destas estruturas está relacionado com o armadilhamento das areias junto ao molhe norte, o que interrompe a deriva litoral e causa um défice sedimentar para as praias localizadas a sul. Contrariamente à esta evolução erosiva das praias adjacentes ao molhe sul, foi observada uma tendência de uma costa em acreção para o troço entre Quiaios e o sul de Praia de Mira, possivelmente controlada pelo fornecimento de areias que são removidas das praias em erosão ao sul dos molhes.

1.1 Introdução teórica

1.1.1 O ambiente litoral

1.1.1.2 Praias

As praias são locais de acumulação de sedimentos não consolidados no litoral que se prolongam desde uma marcada feição fisiográfica (p.ex. arribas, dunas) até uma profundidade em que os sedimentos já não sofrem remobilização pela ação das ondas (profundidade de feixo) (Komar, 1998). Esta faixa do litoral representada pelas praias engloba um domínio subaéreo (praia emersa) e um domínio submarino (praia submersa). A praia emersa é a delimitada pela referida feição fisiográfica e o nível médio da baixa-mar, enquanto a praia submersa se estende do nível médio da baixa-mar até a profundidade de feixo (Komar, 1998). Desde a praia emersa até a praia submersa são destacadas zonas que caracterizam topograficamente o perfil de praia (Figura 1).

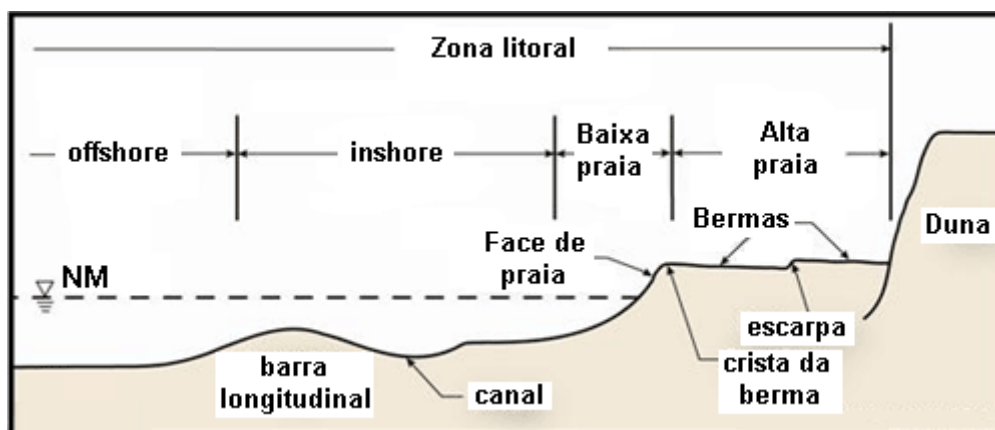


Figura 1: Zonação da praia emersa e submersa, adaptado de Komar (1998).

Esta zonação se inicia na praia alta, geralmente caracterizada pela presença de uma ou mais bermas, formadas pela deposição de sedimentos devido ao espraiamento das ondas. As bermas apresentam uma topografia suave, quase horizontal, cujo limite em direção ao mar é representado pela crista da berma. A face de praia é a zona que se destaca entre a crista da berma mais recente e o nível da maré-baixa, sendo afetada diretamente pelo espraiamento das ondas incidentes. A topografia da face de praia se caracteriza por uma porção côncava, inclinada para o mar. Já no domínio submarino, o perfil de praia é menos acidentado que o da praia emersa. Este domínio é caracterizado por um relevo suave e geralmente convexo que se prolonga até a profundidade de feixo. As barras submarinas são as feições mais expressivas no perfil da praia submersa caracterizadas por

um corpo arenoso, aproximadamente paralelo a linha de costa. As barras submarinas são formadas pelos sedimentos derivados da praia emersa durante condições energéticas, podendo se deslocar em direção a esta em condições de baixa agitação marítima. Não é incomum a presença de mais de uma barra submarina, com cristas paralelas umas a outra (Komar, 1998).

O grau de exposição de uma praia vai determinar na sua morfodinâmica, onde a interação entre as ondas, marés, correntes e as feições topográficas da praia, produzirá o transporte sedimentar transversal e longitudinal a linha de costa. Os diferentes caracteres morfodinâmicos das praias originaram uma classificação na qual se distingue três tipos de praias. Segundo Wright e Short (1984, in Short, 1999), as praias podem ser do tipo refletivas, dissipativas ou intermediárias a estes dois primeiros tipos. As praias dissipativas são caracterizadas como largas, sedimentos finos, com baixo declive na zona de espalhamento, onde ondas energéticas dissipam sua energia. As praias refletivas são caracterizadas por ambientes de baixa energia, areias grosseiras, e face de praia com declive acentuado, onde as ondas incidentes perdem rapidamente sua energia. As praias intermediárias são encontradas desde praias de moderada a alta energia, com ondas de períodos longos, areias finas a médias, e a comum presença de barras submarinas e feições rítmicas na face de praia (cúspides e mega cúspides) (Short, 1999).

1.1.1.3 Dunas frontais

As dunas frontais (*foredunes*) podem ser encontradas em todos os tipos de áreas costeiras e em quase todos os tipos de condições climáticas (Hesp, 2002). Estas são feições morfológicas únicas dentre os tipos de dunas existentes, especialmente restritas, relacionadas com a dinâmica e com os processos eólicos nas praias (Psuty, 1992). Este tipo de dunas apresenta crista paralela a linha de costa, e são formadas pela deposição de areias na vegetação da praia alta, causada pela ação eólica (Hesp *et al.*, 2005).

Hesp (2002) apresenta dois tipos de dunas frontais. O primeiro tipo é a duna frontal incipiente (*incipient foredunes*), formada pela acumulação de areias em vegetação embrionária, ou outros tipos de materiais depositados na praia alta que favoreça a deposição de areias transportadas pelo vento. Este tipo de dunas pode desenvolver-se para o segundo tipo, chamado pelo autor por dunas frontais “estabelecidas” (*established foredunes*). Este segundo tipo apresenta uma comunidade vegetal mais desenvolvida, morfologia mais complexa, maior altura, largura e idade. O sucesso no desenvolvimento deste tipo de dunas frontais vai depender do suprimento de areias; da densidade da cobertura vegetal; das espécies vegetais presentes; do transporte eólico; do clima de ondas

e ventos; da ocorrência e magnitude da erosão causada por ondas associadas a temporais; da evolução a médio a longo termo da praia ou da barreira (erosão, progradação ou estabilidade); da evolução do nível do mar; e por fim, do impacto causado pelo homem nestes corpos sedimentares. Um modelo de desenvolvimento de dunas frontais é apresentado por Hesp (2002), relativamente aos ciclos de evolução para regiões costeiras estáveis, em erosão e em acreção (Figura 2).

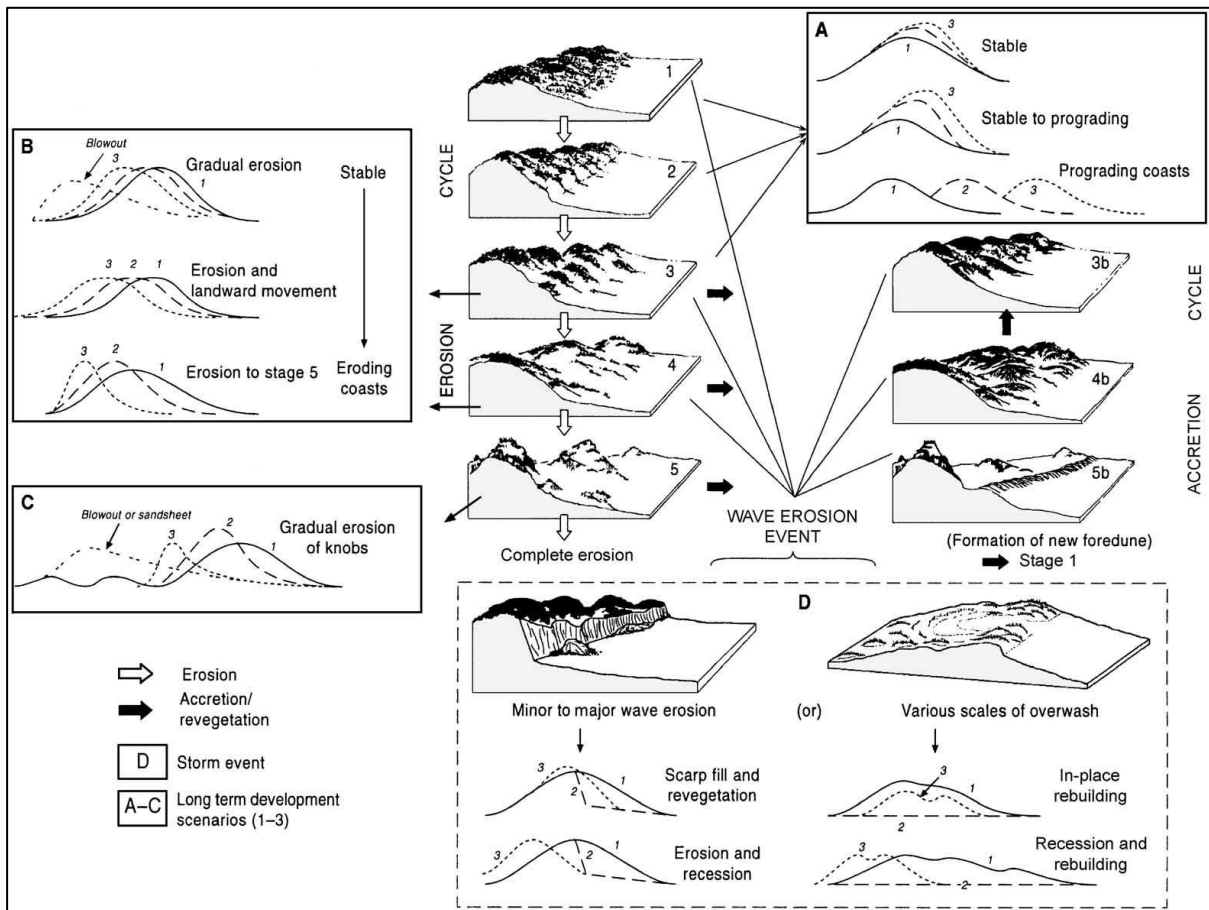


Figura 2: Modelo morfológico de dunas frontais em diferentes estágios de evolução. A progradação e a recessão de uma duna frontal vão depender da evolução da região costeira (estável, erosiva ou acrecionária), resultando em diferentes tipos morfológicos (Hesp. 2002).

Campos de dunas frontais podem ser formados quando uma nova duna frontal incipiente pode se desenvolver em direção ao mar, e que mais tarde irá se transformar numa duna frontal estabelecida. Esta sucessão progradante estabelece um campo de dunas frontais, onde apenas a duna adjacente a praia alta será aquela considerada de fato ativa (Hesp, 2002). Uma duna frontal está ativa quando participa dos processos de trocas sedimentares com a praia, onde o balanço sedimentar irá controlar sua persistência e

desenvolvimento (aporte de sedimentos oriundos da praia) ou sua destruição (erosão e transferência de sedimentos para a praia) (Psuty, 1992).

1.1.2 Definição de linha de costa

A linha de costa pode ser entendida como um limite físico localizado entre o ambiente marinho e o ambiente terrestre. Porém, muito se tem discutido acerca deste tópico, especialmente no que diz respeito ao seu dinamismo, resultante dos diferentes processos de origens naturais e antrópicas atuantes nesta particular região (Camfield & Morang, 1996; Stive *et al.*, 2002). Alguns indicadores podem representar fisicamente este limite, e a sua escolha vai depender essencialmente do material de estudo disponível e da escala temporal em análise, associada à mobilidade de tal indicador (Boak & Turner, 2005; Hanslow, 2007).

1.1.3 Fatores que interferem na variabilidade da linha de costa

Na etapa inicial de um estudo, é importante um completo conhecimento dos processos atuantes na área em foco, para que as mudanças que ocorrem na costa, em qualquer escala temporal, sejam compreendidas (Camfield & Morang, 1996).

A posição da linha de costa comumente é derivada de diversos fatores (Tabela 1) que contribuem para a sua variação, e é de se ressaltar que a linha de costa deve ser entendida meramente como um indicador que irá refletir o comportamento da face de praia (Stive *et al.*, 2002). Segundo este autor, a variabilidade temporal da linha de costa é simples de ser observada quando as suas diferentes posições ao longo do tempo são percebidas. Sendo assim, um indicador da linha de costa deve cumprir com as exigências do estudo a ser realizado, tendo como princípio a sua representatividade espacial e temporal.

A visualização da linha de costa como um limite físico se torna muitas das vezes difícil, simplesmente pelo fato de um limite físico remeter a algo estático e imutável (espacialmente / temporalmente). De fato, a linha de costa varia dentro de uma certa faixa espacial, cujo dinamismo pode começar a ser entendido pela variação das marés. As marés atuam diariamente no posicionamento do nível das águas, e de acordo com seu período e amplitude podem ter grande significância. Este movimento cíclico causa regressões e transgressões diárias. O efeito das marés pode ser potenciado pela declividade da costa, um outro fator muito representativo na variação espacial da linha de costa. As praias de baixo declive facilitam a invasão das águas, onde dezenas de metros de variação horizontal durante um ciclo mareal pode ocorrer. Este último é considerado como uma das principais

fontes de erros na cartografia da linha de costa para estudos de sua evolução naquelas zonas onde as marés são mais significativas.

O clima de ondas da área estudada também deve ser considerado, especialmente em zonas costeiras de alta exposição às condições energéticas do mar. É na zona de espraiamento que a energia das ondas causa maior efeito, provocando variações do nível da água que podem variar até alguns metros em poucos segundos. Juntam-se as ondas ao regime de ventos e à passagem de temporais, os quais podem ter influência significativa na sobrelevação das águas. Estas épocas energéticas, quando associadas a marés vivas, podem causar grandes danos a edificações naturais e antrópicas na faixa costeira devido ao seu grande poder erosivo (Short, 1999).

Para além destes fatores que modificam a posição de uma linha de costa em uma escala de tempo mais curta, a discussão sobre a quantidade de sedimentos que está envolvida em um litoral também se torna importante. As perdas e ganhos de sedimentos vão estar relacionadas com a erosão e deposição em zonas costeiras, tendo impacto direto na variabilidade (tendência para regressão ou progradação) da linha de costa. As fontes de sedimentos são geralmente representadas pelos materiais sólidos transportados pelos rios, pela deriva litoral e através da erosão de arribas. As perdas são relacionadas com o transporte de sedimentos para a plataforma continental interna; pelo transporte para sotamar causado pela deriva litoral; e pelo transporte de sedimentos mais finos realizado pelos ventos, geralmente propiciando a formação de dunas (Komar, 1998). As perdas e ganhos também ocorrem sazonalmente pelo transporte sedimentar no sentido *onshore-offshore*, correlacionados com a ação energética das ondas, sazonalmente ou durante temporais, determinando assim o perfil da praia (Komar, 1998).

Considerando uma escala de tempo mais alargada sobre a evolução das linhas de costa, a discussão da variação do nível do mar entra em questão. O nível do mar numa escala global demonstra uma subida que se iniciou no último máximo glacial. Mais recentemente, a aceleração na sua subida tem sido explicada pelo aquecimento da atmosfera causada pela queima de combustíveis fósseis, causando o derretimento das calotes polares e a expansão volumétrica das águas dos oceanos (Williams *et al.*, 2009).

Tabela 1: Causas naturais e fatores associados a evoluções de uma linha de costa. Adaptado de Stive *et al.* (2002).

Scale	Natural causes/factors	Typical evolutions	Subsection in this paper
Very long term (time scale: centuries to millenia; space scale: ~ 100 km and more)	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 'sediment availability' ⇒ relative sea-level changes ⇒ differential bottom changes ⇒ geological setting ⇒ long-term climate changes ⇒ paleomorphology (inherited morphology) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ (quasi-)linear trends ⇒ trend changes (reversal, asymptotic, damping) ⇒ fluctuations (from (quasi-) cyclic to noncyclic) 	Late Holocene Variability
Long term (time scale: decades to centuries; space scale: ~ 10–100 km)	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ relative sea-level changes ⇒ regional climate variations ⇒ coastal inlet cycles ⇒ 'sand waves' ⇒ extreme events 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ (quasi-)linear trends ⇒ fluctuations (from (quasi-) cyclic to noncyclic) ⇒ trend changes (reversal, asymptotic, damping) 	Intercentennial variability
Middle term (time scale: years to decades; space scale: ~ 1–5 km)	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ wave climate variations ⇒ surf zone bar cycles ⇒ extreme events 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ fluctuations (from (quasi-) cyclic to noncyclic) ⇒ (quasi-)linear trends ⇒ trend changes (reversal, asymptotic, damping) 	(Inter-)annual and (inter-)decadal variability
Short term (time scale: hours to years; space scale: ~ 10 m–1 km)	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ wave, tide and surge conditions ⇒ seasonal climate variations 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ fluctuations (from (quasi-) cyclic to noncyclic) ⇒ (quasi-)linear trends ⇒ trend changes (reversal, asymptotic, damping) 	(Inter-)seasonal and (inter-)annual variability

1.1.4 Delimitação de linhas de costa

1.1.4.1 Base de dados

É necessário recorrer a alguma fonte para se extrair sucessivas posições da linha de costa. As fontes são variadas, desde mapas históricos, fotografias aéreas, levantamentos de campo (p.ex. perfis de praia), até métodos de detecção remota (p.ex. imagens de satélite, imagens de vídeo, LIDAR). A resolução requerida pelo trabalho que se deseja realizar deve ser compatível com a resolução da fonte dos dados, evitando a introdução de erros nas taxas evolutivas da linha de costa. Esta resolução está relacionada com as taxas estimadas de evolução, o período de estudo e a qualidade final dos resultados desejada (Moore, 2000), de modo que os resultados obtidos em um estudo sobre a evolução da linha de costa são tão fiáveis quanto os dados que permitiram este estudo (Crowell *et al.*, 1991).

Outro fator a considerar é a disponibilidade dos dados para a área a ser estudada. Um estudo de médio termo da evolução da linha de costa necessita de uma cobertura espacial e temporal relativamente alargada, e por isso, muitas das zonas costeiras não são passíveis desta análise pela falta de dados. Uma das principais fontes de dados sobre linhas de costa é certamente derivada da fotografia aérea. Ainda que os programas de tomadas de fotografias aéreas verticais tenham começado consistentemente há pouco mais de 50 anos, esta fonte é valiosa porque apresenta uma boa cobertura espacial e temporal, de onde

podem ser extraídas posições históricas da linha de costa (Boak & Turner, 2005; Moore, 2000).

O princípio da delimitação da linha de costa de fotografias aéreas consiste na relação geométrica que existe entre os objetos e a imagem destes objetos criada pela câmara fotográfica. Este princípio é conhecido como colinearidade, no qual uma linha reta é capaz de unir o centro da lente da câmara fotográfica, a imagem do objeto e o objeto real (Moore, 2000; Thieler & Danforth, 1994) (Figura 3).

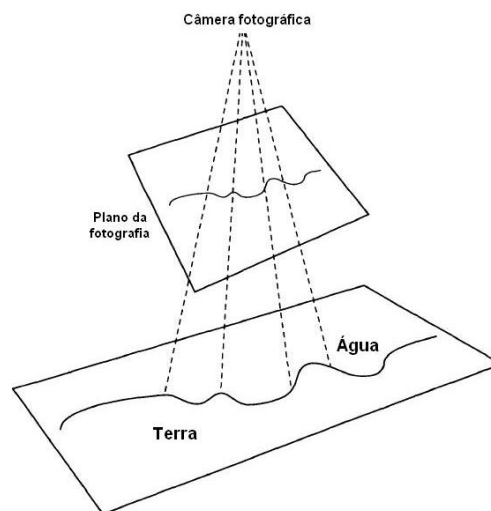


Figura 3: O princípio da colinearidade entre um objeto no plano real e a imagem no plano da fotografia. Neste caso está representada a relação espacial entre uma linha de costa no plano real e o plano de uma fotografia aérea vertical (Figura adaptada de Thieler & Danforth, 1994).

Esta relação entre o objeto e a sua imagem pode ser afetada durante o processo fotográfico, nomeadamente por distorções das lentes e deformações dos filmes (Thieler & Danforth, 1994). Outras condições não dependentes da câmara fotográfica também causam distorções nas fotografias, deslocando a imagem do objeto para um ponto que não corresponde à sua posição real. Estas distorções são principalmente causadas pelas variações do relevo, pela obliquidade da câmara (*tilt*) e variações na escala da foto derivadas de mudanças na altitude do voo (Camfield & Morang, 1996; Crowell *et al.*, 1991; Moore, 2000; Thieler & Danforth, 1994) (Figura 4; Figura 5).

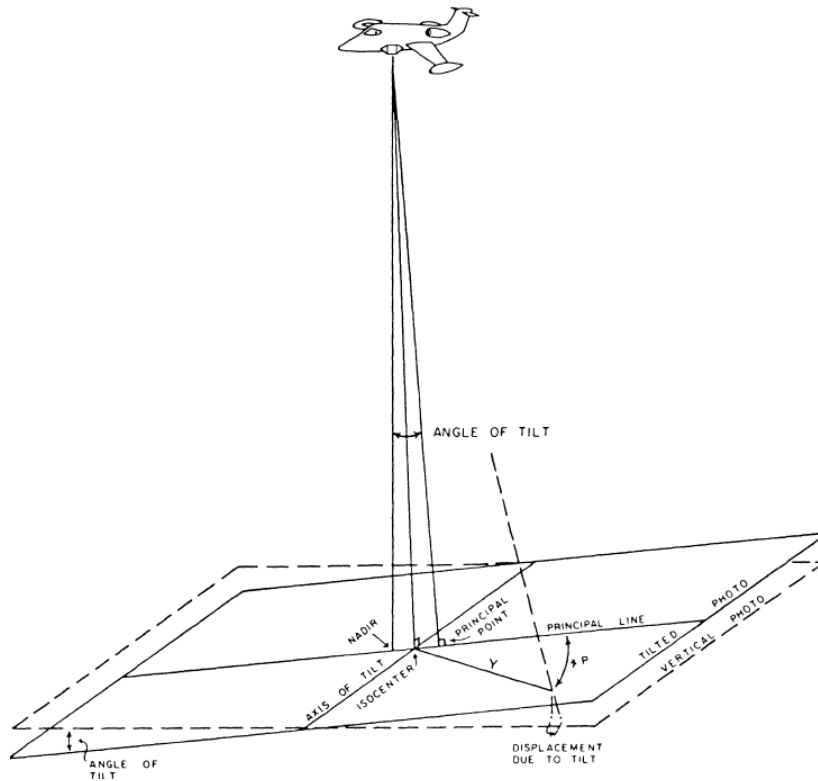


Figura 4: Distorção (*angle of tilt*) causada pela obliquidade da câmera durante a tomada de uma fotografia aérea vertical, a qual pode causar um desvio da posição de uma linha de costa. Uma variação na altitude do plano de voo também terá influência na relação espacial entre o plano real e o plano da fotografia devido a variações de escala (Crowell *et al.*, 1991).

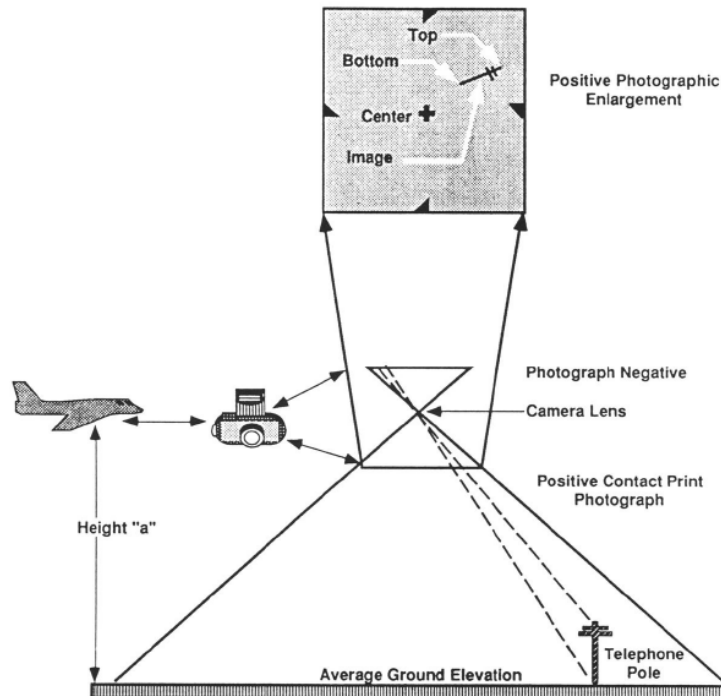


Figura 5: Distorção causada pela variação de relevo no plano real. Esta distorção está representada na figura pelo desvio da posição real do topo de uma torre. O mesmo pode ocorrer quando há variações altimétricas no relevo (Crowell *et al.*, 1991).

As fotografias aéreas não são mapas projetados e por isso não possuem sistema de coordenadas (Camfield & Morang, 1996). Por esta razão, deve-se realizar um pré-tratamento das fotografias para que estas possam ser utilizadas de modo a fornecer informações espaciais de confiabilidade. As fotografias devem ser georeferenciadas e rectificadas baseando-se em pontos de controle, adequando-as para um sistema de coordenadas a serem trabalhadas (Moore, 2000).

Um outro método para se obter o posicionamento de linhas de costa deriva de levantamentos de campo através do sistema de posicionamento global. O sistema de posicionamento em tempo real DGPS-RTK- (*Differential Global Positioning System-Real Time Kinematic*) permite uma rápida coleta de dados com grande densidade espacial (Harley *et al.*, 2011). O levantamento dos dados pode ser auxiliado por um veículo motorizado, no qual o equipamento é montado. A uma velocidade constante, a linha de costa é mapeada conforme o deslocamento sobre a feição escolhida para indicar a posição de uma linha de costa (Boak & Turner, 2005).

Os estudos sobre as áreas costeiras também podem ser realizado através de imagens de satélite, imagens de vídeo e por LIDAR (*Light Detection and Ranging Technology*), favorecidos pelo desenvolvimento das técnicas de processamento de imagem (Boak & Turner, 2005).

1.1.4.2 Indicadores de linha de costa

Segundo Boak & Turner (2005), “um indicador de linha de costa é uma feição utilizada para representar a verdadeira posição da linha de costa” (Figura 6). Após terem sido apresentados os fatores que interferem na variabilidade da linha de costa, se percebe que um indicador está intrinsecamente relacionado com a dinâmica costeira. A aplicação de um indicador em uma certa área deve ter em consideração todo o conjunto de processos ocorrentes, os quais vão interferir na mobilidade de tal indicador (Hanslow, 2007). Os indicadores são agrupados em três categorias. A primeira é aquela em que a linha de costa é delimitada com base numa feição visível (p.ex. crista da berma). A segunda é a detecção da linha de costa através da variação do nível da água em um perfil de praia, tendo como base dados das alturas das marés. A última categoria representa linhas de costas que são extraídas através de análises digitais da imagem pelo reconhecimento de feições não visíveis ao olho humano (Boak & Turner, 2005).

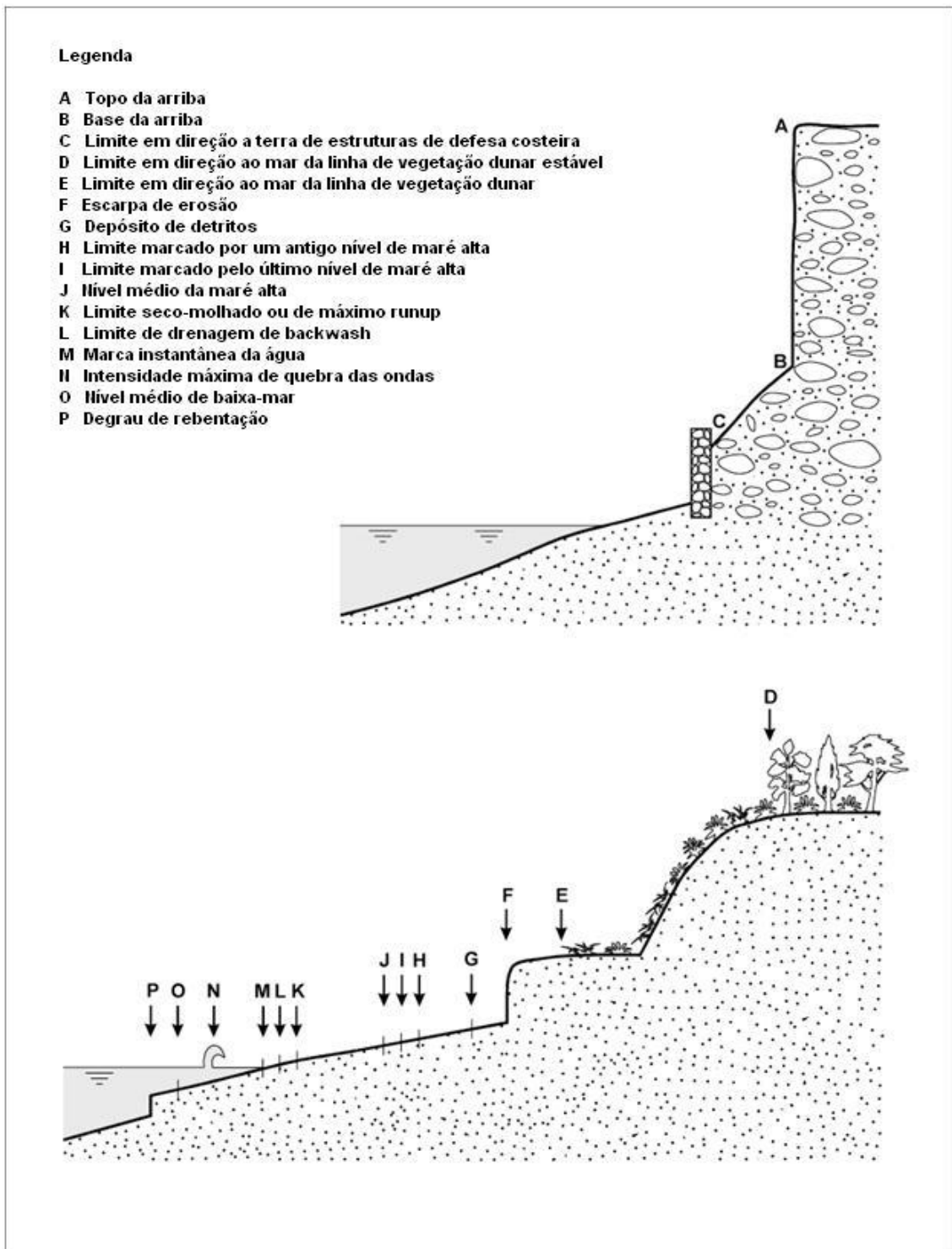


Figura 6: Representação espacial dos indicadores de linha de costa mais utilizados (Adaptado de Boak & Turner, 2005).

Segundo Hanslow (2007), diferentes indicadores podem resultar em diferentes taxas de evolução da linha de costa para um mesmo período de estudo. Cada indicador apresenta vantagens e desvantagens sobre os outros, porém a escolha de um destes deve se basear nas características da área a ser estudada, especialmente na interação espaço-temporal

entre os seus processos e a sua geomorfologia (Hanslow, 2007; Stive *et al.*, 2002) (Figura 7).

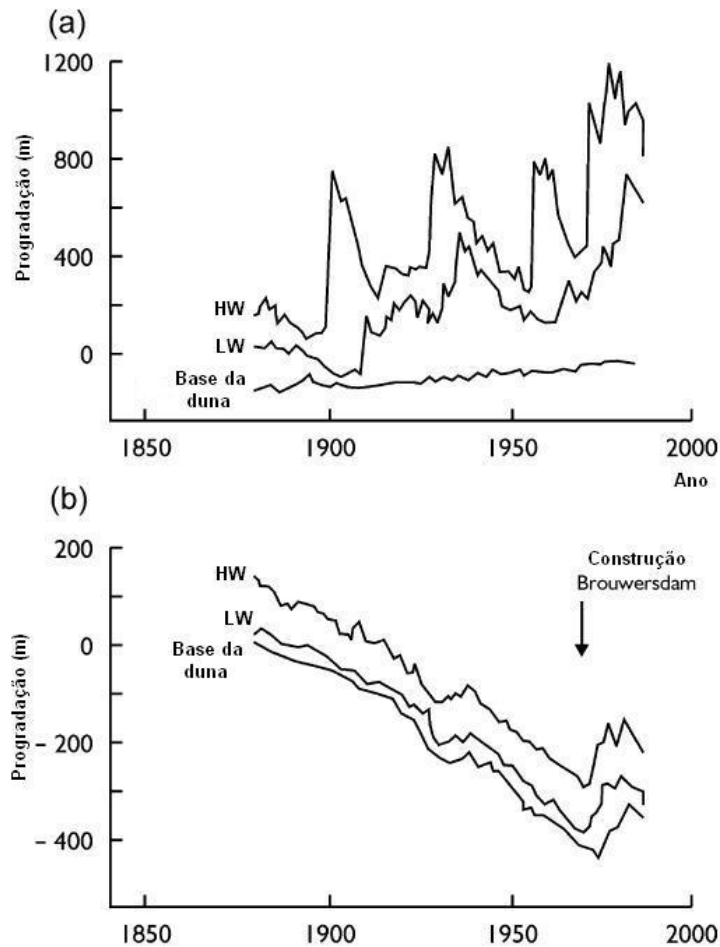


Figura 7: Tendência da evolução da linha de costa com a aplicação de três diferentes indicadores (HW: nível da maré alta; LW: nível da baixa-mar; Base da duna frontal). A Progradação da linha de costa, segundo os três indicadores utilizados, demonstra suas diferentes respostas evolutivas. O gráfico (a) representa um segmento costeiro sem influência antrópica, onde a evolução foi relacionada com a migração de bancos arenosos. O gráfico (b) está relacionado com um segmento onde houve tal influência, nomeadamente pela construção de uma barragem.

Um dos indicadores mais utilizados na literatura é a linha de preia-mar máxima (*High water line* – HWL). Este indicador é representado pelo limite máximo atingido pela água numa praia durante a preia-mar, o qual é considerado de fácil identificação tanto no campo quanto em fotografias aéreas (Boak & Turner, 2005; Crowell *et al.*, 1991; Moore, 2000; Thieler & Danforth, 1994). A delimitação da HWL é mais precisa em levantamentos de campo, já que a sua visualização é facilitada (Crowell *et al.*, 1991). Porém, as fotografias aéreas apresentam vantagens sobre este último método porque permitem um estudo espacial mais eficiente, e com precisão aceitável.

Os erros na cartografia da HWL estão relacionados com: a mobilidade diária deste indicador relativo a variação da maré; a visualização deste indicador em fotografias aéreas de baixa qualidade; a capacidade do utilizador na sua identificação (Moore, 2000). A linha de preamar média (*Mean High Water Line* – MHWL) é um outro indicador, derivado da posição média da variação da HWL. Em condições energéticas moderadas, geralmente se pode assumir que a posição da HWL é semelhante a da MHWL (Crowell *et al.*, 1991). A posição destes indicadores pode ser corrigida caso haja disponibilidade de dados sobre a variação da maré, sobre a hora e data da fotografia aérea e informações topográficas da praia (Moore, 2000). Em áreas remotas, dados precisos sobre a variação das marés podem não estar disponíveis, dificultando tal correção.

Ainda considerando os indicadores relacionados com a linha da água, o limite entre a areia seca e areia molhada também pode ser utilizado. Este indicador (seco-molhado) está mais sujeito a variações espaciais, em curtos intervalos de tempo, já que é constantemente influenciado pela maré e pelo espraiamento das ondas. A vantagem deste indicador é que sua visualização em fotografia aérea é muito facilitada pela clara diferença de contraste entre a areia seca e molhada. Este indicador também tem posição semelhante a HWL, o que permite a comparação entre ambos (Dolan *et al.*, 1980). O limite entre a areia e a água é considerado outro indicador de linha de costa. De fato, este indicador entra em congruência com a definição clássica da linha de costa para praias arenosas, porém, está fortemente sujeito a condição energética do local, podendo ser um limite muito dinâmico.

Um conjunto de indicadores não relacionados com posições da linha de água é também considerado na literatura. A utilização destes indicadores pressupõe que a sua posição ao longo do tempo reflete a progradação/regressão da linha de costa. Entre os mais citados indicadores, estão a posição da crista da berma ou feições presentes nas dunas frontais e nas arribas (Boak & Turner, 2005). As dunas frontais apresentam feições que podem refletir as taxas de evolução de uma zona costeira, consideradas como indicadores da linha de costa. Dentre estas feições estão: o limite da vegetação dunar em direção ao mar; o limite da vegetação dunar estável; o volume da duna (Boak & Turner, 2005; Hanslow, 2007). Ressalvas devem ser feitas antes da utilização destes indicadores, especialmente quanto à presença ou não da vegetação, o tipo de vegetação, assim como as suas variabilidades espaciais e temporais (Hanslow, 2007). A variabilidade destes indicadores vai variar de acordo com o ataque marinho às dunas, que ao longo de vários anos, definirá a evolução desta linha de costa. Caso haja uma progradação da linha de costa, estes indicadores podem não representar exatamente as taxas de evolução, já que a fixação da vegetação e o estabelecimento de uma duna ocorrem a ritmos mais lentos (Ferreira, 1993).

O comportamento das dunas está menos sujeito a eventos de maior frequência na linha de costa, apresentando uma evolução mais estável, especialmente em análises que consideram escalas de tempo alargadas (Stive *et al.*, 2002). É possível que a comparação entre a taxa de migração da HWL e a da base de uma duna frontal apresentem valores diferentes, especialmente em troços costeiros onde não há uma tendência clara de progradação/regressão (Stive *et al.*, 2002).

1.2 Justificativa e objetivos do trabalho

Os estudos sobre a evolução da linha de costa são importantes para o conhecimento das mudanças ocorridas no litoral. Geralmente estes estudos estão associados com linhas de costa em regressão, onde há vulnerabilidade das zonas costeiras diante dos processos energéticos que ali ocorrem (Addo *et al.*, 2008; Anfuso *et al.*, 2011). Considerando que a maioria da população mundial vive em zonas costeiras, um recuo da linha de costa, para além de representar perda de território, põe em risco as actividades e estruturas presentes (Komar, 1998). Utilizando-se destas taxas de regressão, é possível reconhecer a velocidade do avanço das águas do mar e assim planear uma gestão costeira eficiente que faça frente a erosão. A fim de manter o desenvolvimento das suas actividades, o homem utiliza de variadas formas para defender a “sua” costa, resultando numa artificialização das margens através de obras de protecção costeira.

A faixa litoral entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro demonstra uma evolução controlada essencialmente por uma interrupção da deriva litoral a barlamar dos molhes, causando grandes recuos da linha de costa a sotamar (Ferreira, 1993; Teixeira, 1994). Os estudos sobre esta evolução incidem até o ano de 1990 e demonstram o agravamento da erosão costeira ao longo dos anos. Diante desta problemática, o objetivo geral desta dissertação é apresentar o comportamento evolutivo da linha de costa entre os anos 1958 e 2011. Para isto, o desenvolvimento deste estudo foi dirigido por alguns objetivos específicos, os quais são:

- Compreender os processos atuantes na faixa litoral entre o cabo Mondego e Aveiro, responsáveis para a evolução desta linha de costa;
- Selecionar um indicador que melhor represente as variações da linha de costa de acordo com os processos que modelam o litoral;

- Apresentar os valores das taxas evolutivas para todos os períodos entre as fotografias aéreas disponibilizadas, bem como os valores das taxas evolutivas recentes (1995-2011) e de médio-termo (1958-2010);

- Perceber as condicionantes e particularidades da evolução ao longo dos cinquenta quilómetros de faixa costeira.

Capítulo II - Área de estudo

2.1 Enquadramento Geográfico

A área de estudo está localizada na costa oeste portuguesa, no troço limitado ao sul pelo cabo Mondego e ao norte pelos molhes portuários de Aveiro (Figura 8). Este troço representa aproximadamente cinquenta quilómetros de praias arenosas com orientação N14°E (Clarke & Rendell, 2006; Dinis, 2004), interrompido localmente por esporões e enrocamentos.

2.2 Enquadramento Geológico

A área está localizada na costa do centro de Portugal. Dinis (2004) definiu a “Fachada Litoral Espinho-Quiaios”, um sector delimitado pelo cavalgamento da serra da Boa Viagem e pelo eixo Arunca-Montemor-Palhaça. A serra da Boa Viagem é estruturalmente a área mais complexa, formada por um cavalgamento entre rochas mesozóicas e formações sedimentares quaternárias, gerado durante compressão bética da orogenia alpina (Cabral & Ribeiro, 1988).

Os depósitos modernos (Holocénico) estão representados por depósitos de aluviões na laguna de Aveiro, areias de dunas eólicas e areias de praia (Ferreira, 1993). A cobertura por areias de dunas na área de estudo relaciona-se com eventos de invasão de areias eólicas, resultando em extensos campos dunares (Figura 9) que atingem aproximadamente sete quilómetros para leste (Almeida, 1995; Castilho, 2010).

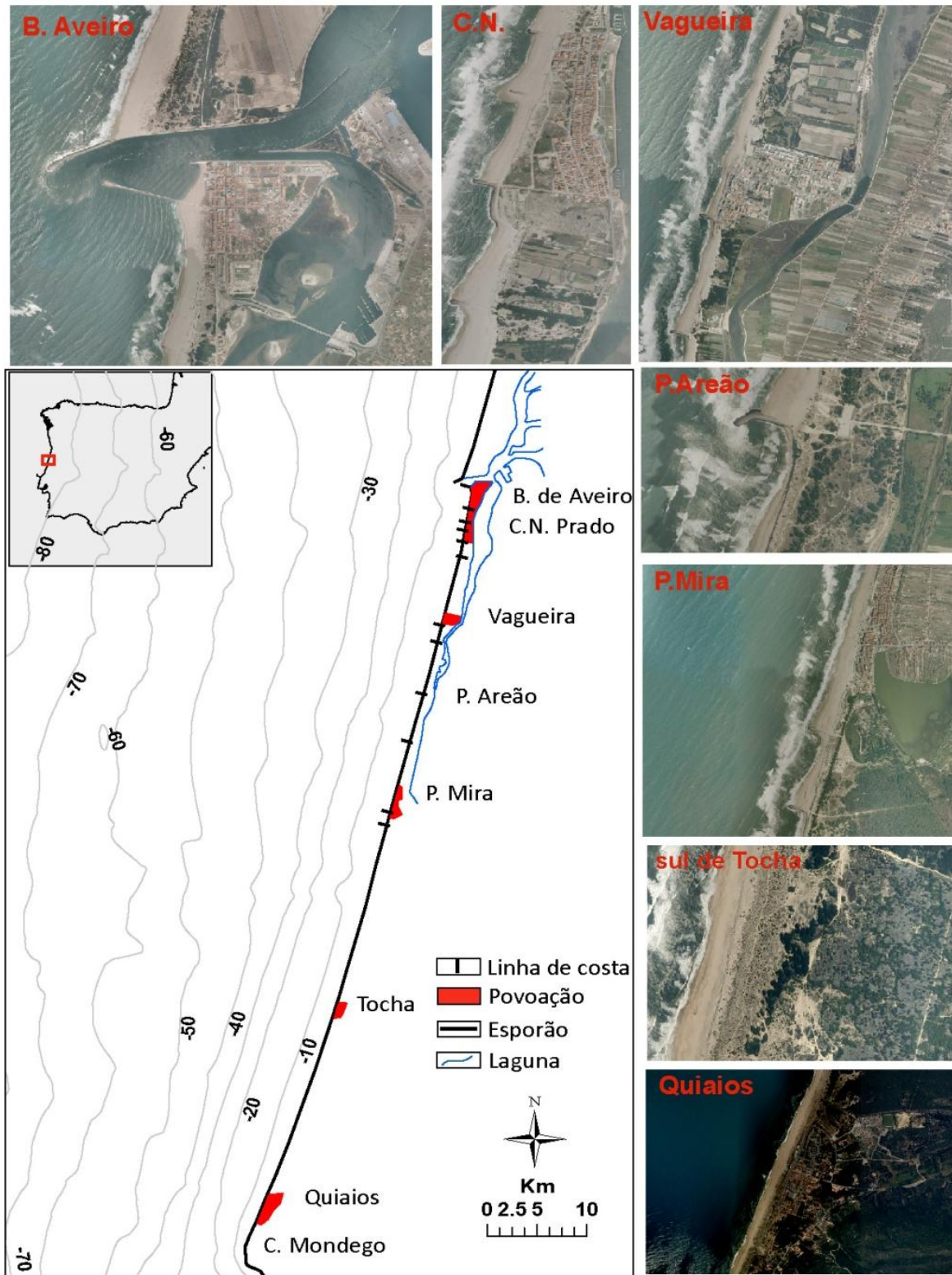


Figura 8: Mapa de localização da área de estudo. A área é representada pela faixa litoral entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro (Portugal central). Este segmento, de aproximadamente cinquenta quilómetros de extensão, apresenta frentes urbanas de povoações, e é interrompido por onze esporões. As fotografias aéreas verticais (ortofotos de 2007, IGP) estão relacionadas com os locais indicados no mapa. A batimetria apresentada é derivada do modelo morfológico INGMAR, realizado pelo LNEG.

2.3 Enquadramento Geomorfológico

A faixa costeira em questão é uma zona aplanada, de cotas baixas, que se estende paralelamente à linha de costa por quase toda a área de estudo até o canal de Mira (Figura). O sector oriental da área de estudo é dominado pelos campos dunares supracitados, de formas e orientações distintas, com destaque para as dunas transversas (Almeida, 1995) (Figura 9).

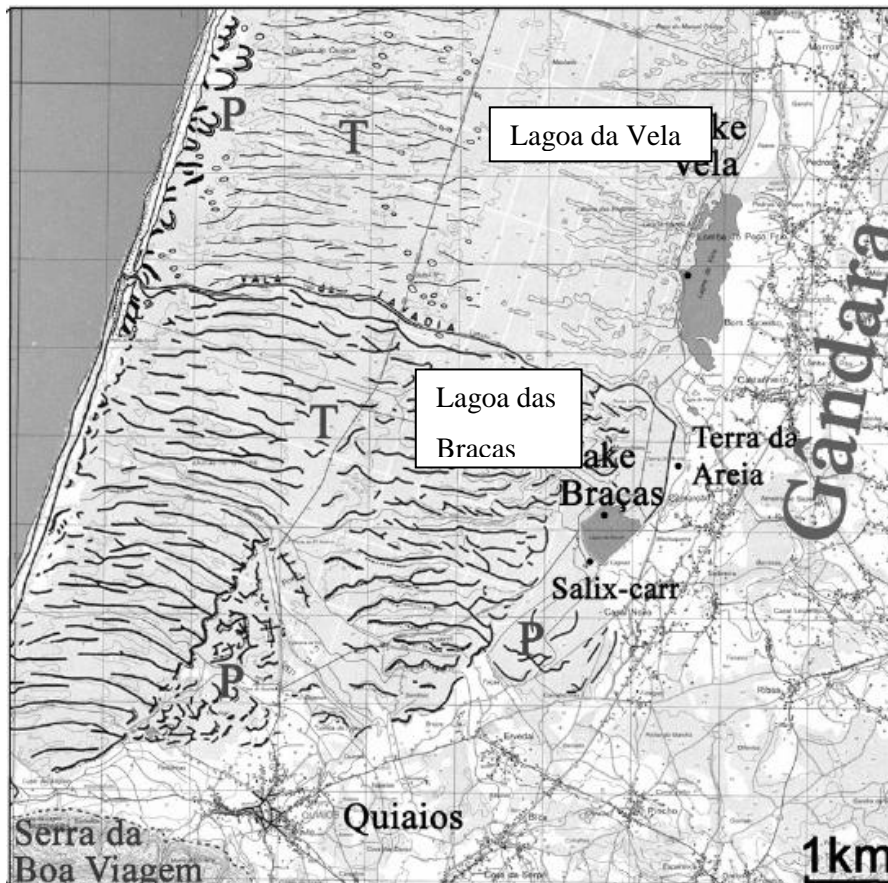


Figura 9: Cristas das dunas ocorrentes na planície costeira entre Quiaios e Mira (T-Transversas, P-Parabólicas). Entre o campo dunar e a planície de Gândara, destaca-se a presença das lagoas da Vela e da Braça (Danielsen, 2008a).

2.3.1 Corpos Lagunares

Dentre os corpos lagunares, a laguna de Aveiro é o mais expressivo, com uma superfície total de aproximadamente 170 Km² (Teixeira, 1994). Esta laguna tem morfologia irregular, com cerca de 45 Km de comprimento entre Ovar e Mira, e aproximadamente dez quilómetros de largura máxima no paralelo dos molhes portuários (Figura 10). Acredita-se que sua origem está relacionada com um sistema de laguna-barreira que começou a ser

formada no século X, a partir de uma restinga arenosa próximo a Espinho (Figura 10). A deriva litoral para sul possibilitou o seu desenvolvimento, que por volta do século XIV já se prolongava até Aveiro (Corrochano, 1997; Dias *et al.*, 2000). O seu contínuo desenvolvimento possibilitou a conexão com o continente junto à Mira em meados do século XVIII, formando assim aproximadamente 100 Km de costa arenosa entre Espinho e o cabo Mondego (Ferreira & Dias, 1992).

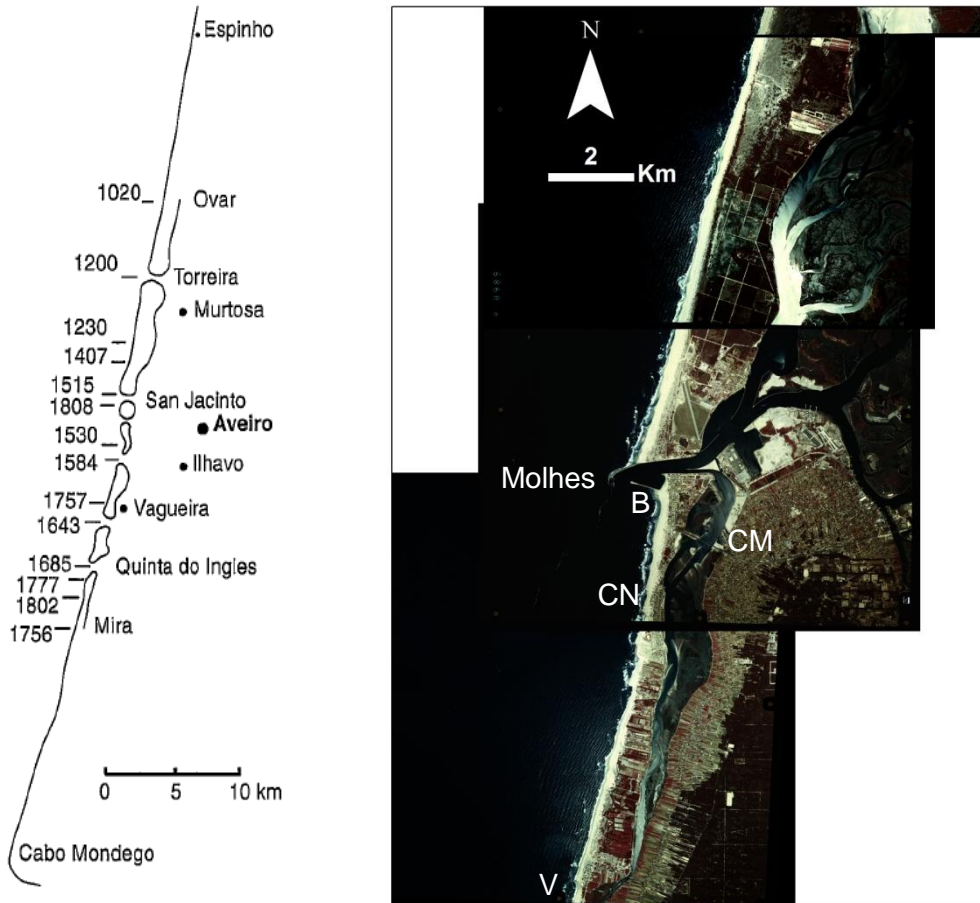


Figura 10: As diferentes posições da barra de Aveiro durante a formação da restinga arenosa (Corrochano e tal., 2007) e a atual configuração da laguna (Ortofotografia de 1995, IGP), com o canal artificial estabilizado pelos molhes portuários de Aveiro (B - Barra de Aveiro; CM - canal de Mira; CN - Costa Nova do Prado; V - Vagueira).

A laguna é alimentada por uma bacia de drenagem da qual o rio Vouga é o mais expressivo (Teixeira, 1994). Os rios apresentam pouca competência, que em conjunto com outros fatores, levam a um intenso assoreamento do estuário. Também se destaca a grande ocupação dos bordos da laguna (p.ex. Instalações portuárias, salinas, estradas) causando modificações na sua morfologia original (Ferreira, 1993). A comunicação entre a laguna e o mar ocorre através de uma barra artificialmente estabilizada pelos molhes portuários de

Aveiro (Figura 8; Figura 10). Com o término de sua construção no ano de 1958, estas estruturas, em especial o molhe norte, vêm atuando fortemente como barreiras frente à deriva litoral, o que resulta num déficit sedimentar a sul. Estes molhes foram prolongados, e atualmente, o molhe norte e o molhe sul apresentam 1200 e 700 m, respectivamente.

Na Praia de Mira está presente um corpo de água conhecido como Barrinha de Mira de dimensões entre 800 m de largura e 1 Km de comprimento (Ferreira, 1993). Esta lagoa está conectada com a laguna de Aveiro através do canal de Mira (Figura 10). Este canal de maré situa-se paralelamente a linha de costa, entre a faixa costeira arenosa e o campo dunar. Este canal possui 16 Km de comprimento e 750 m de largura máxima, com orientação NNE-SSO (Corrochano, 1997).

Um conjunto de lagoas naturais de água doce é encontrado a oriente dos campos dunares entre Quiaios e Palheiros de Tocha, a 7 Km da linha de costa atual. Dentre estas lagoas, as de maiores dimensões são a lagoa das Braças, lagoa da Vela, lagoa Salgueira e a lagoa dos Teixoeiros, orientadas de forma paralela à linha de costa (Castilho, 2008) (Figura 9). A formação destas lagoas está relacionada com afloramentos da superfície freática, onde geralmente existem fluxos de água (Castilho, 2008), descartando-se a idéia de uma possível relação das lagoas com uma pretérita posição mais a oriente da linha de costa (Dias *et al.*, 2000).

2.3.2 Praias

Em quase toda a área de estudo a praia faz contato com um cordão dunar frontal, exceto em segmentos da costa onde existem populações e/ou onde a erosão foi suficiente para causar a destruição total deste cordão dunar. Segundo Ferreira (1998), as praias da área de estudo são classificadas como dissipativas e refletivas, com estágios de transição, relacionadas com a marcada sazonalidade no perfil de praia (Figura 11).

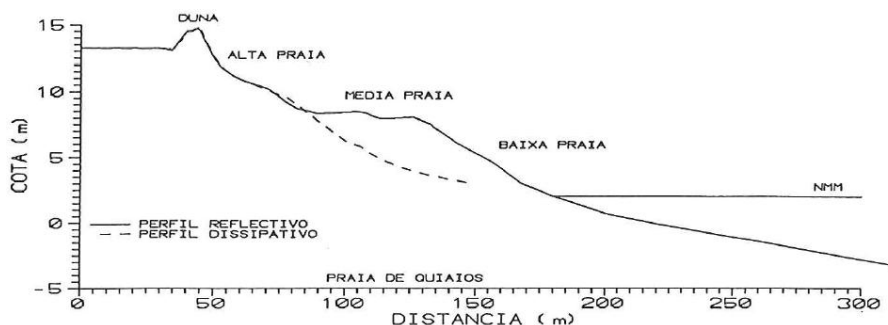


Figura 11: Perfis refletivos e dissipativos típicos da praia de Quiaios, onde ainda é possível verificar a presença de um cordão dunar frontal (Ferreira, 1993).

Considerando a morfologia da praia emersa, o trecho entre Aveiro e o Cabo Mondego pode ser dividido em dois sectores. Um setor setentrional onde a praia é pouco larga, com uma berma pouco desenvolvida ou mesmo ausente, onde o contato com a base do cordão é geralmente feito por uma arriba, sendo comum que o limite máximo da preia-mar coincida com este limite. Neste setor o cordão dunar frontal encontra-se degradado ou mesmo inexistente (Figura 12), e é comum a presença de estruturas de defesa costeira (esporões e enrocamentos). O setor meridional é caracterizado por uma praia geralmente extensa, com uma berma bem desenvolvida. É possível a ocorrência de duas bermas, devido a preservação de uma berma mais antiga na praia alta. Geralmente neste setor, o contato com a base da duna só é atingido pela água em condições de preia-mar de marés vivas, favorecendo uma franja litoral mais estabilizada, tendo como um indício disto a presença de dunas embrionárias com alguma vegetação (Figura 12).

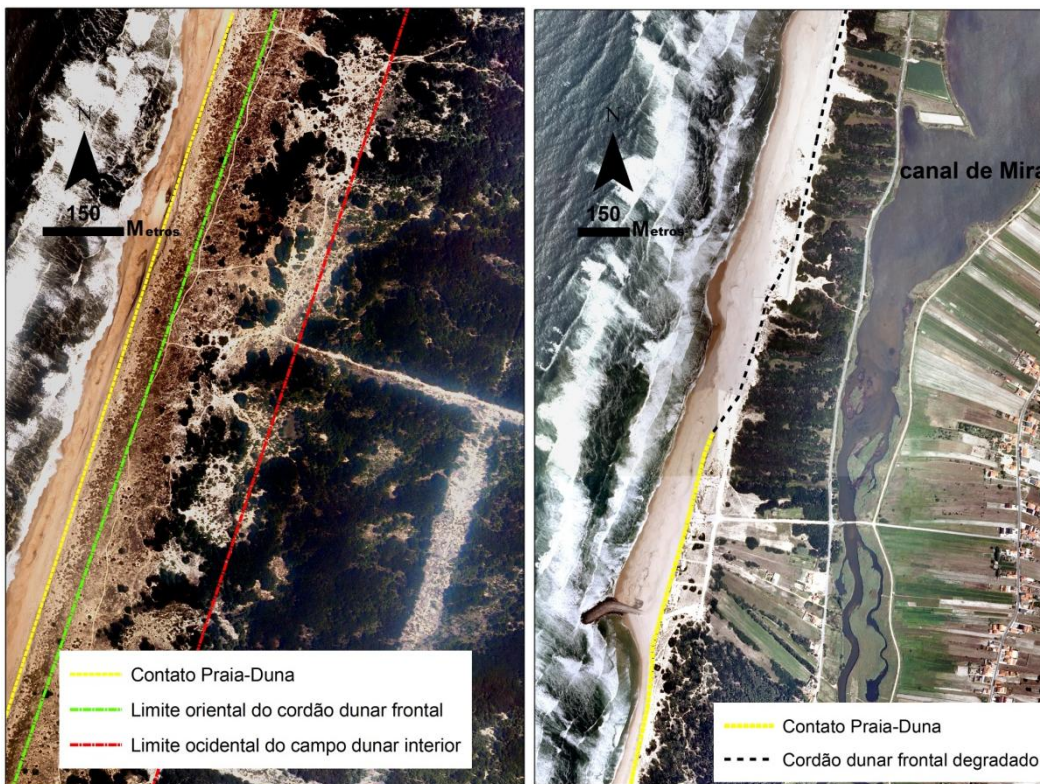


Figura 12: Principais limites morfológicos para a faixa litoral entre o cabo Mondego e Aveiro. A imagem da esquerda representa os limites típicos para a zona meridional, com um contato entre a praia e o cordão dunar frontal bem definido, uma zona aplanada entre este cordão dunar e o limite ocidental do campo dunar interior estabilizado por uma densa floresta de pinha. A imagem da direita representa a faixa litoral da zona setentrional, interrompida por esporões, e com um cordão dunar frontal degradado.

Os sedimentos das praias podem ser caracterizados como areias médias, entre bem a moderadamente calibradas (Teixeira, 1994). Apresentam tendência simétrica, fraca

componente bioclástica (5%), compostas maioritariamente por grãos de quartzo subanguloso a subrolado. Para sul, há uma tendência de aumento progressivo dos diâmetros médios, diminuição do grau de calibragem e uma assimetria no sentido dos grosseiros (Teixeira, 1994).

A praia submersa está situada entre a linha de água mais baixa durante baixa-mar de marés vivas e a profundidade de feixo (a partir da qual não ocorrem trocas sedimentares com o litoral). É caracterizada por barras submersas relacionadas com a transferência de sedimentos realizada pelas ondas entre a praia intermareal e a zona submersa como consequência do efeito da ondulação (Ferreira, 1993). Ferreira (1993) analisou levantamentos batimétricos e classificou dois tipos de barras como internas (*inner bar*) e barras externas (*outer bar*) (Figura 13). As barras internas são menos frequentes e suas formações estão relacionadas com a erosão da praia emersa, apresentando deslocamento para a praia em condições de menor agitação marítima. Já as barras externas são corpos sedimentares mais largos, alongados e sub-paralelos à praia, com grande importância na dissipação da energia de ondas e consequentemente na proteção do litoral. Estas barras são menos desenvolvidas no norte da área de estudo, a partir de Praia de Mira, e às vezes incipientes (Figura 8).

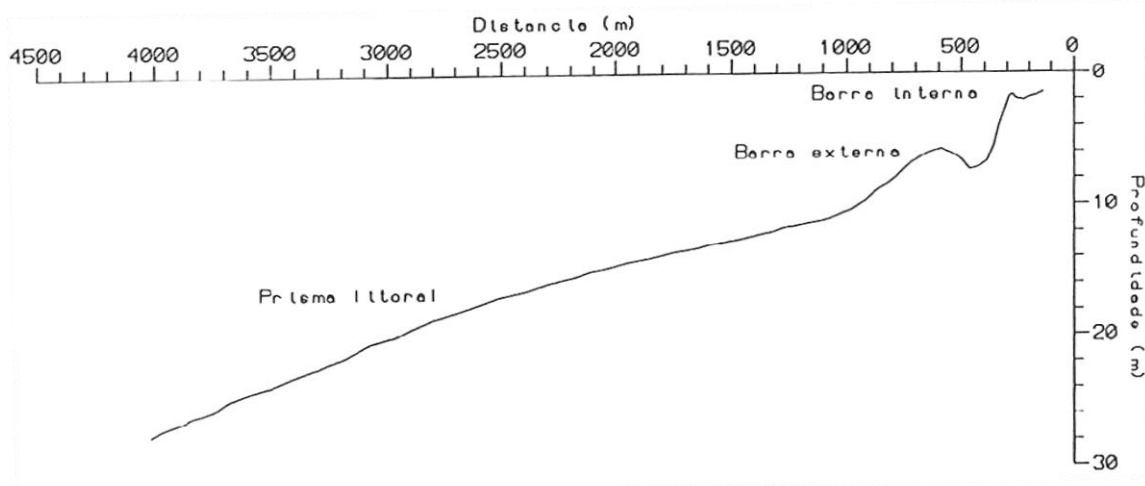


Figura 13: Perfil da praia submersa, onde podem ser encontradas até duas barras submarinas (barra interna e barra externa). Para o mar, ocorre um prisma litoral aplanada e de baixo pendor (Ferreira, 1993).

2.3.3 Dunas eólicas

As dunas eólicas presentes na área de estudo estão representadas por um cordão dunar frontal, e por um extenso campo de dunas interiores, representado por dunas transversas e dunas parabólicas (Figura 9). As dunas que ocorrem na área de estudo possuem morfologias e origens distintas. O cordão dunar frontal, paralelo a linha de costa e de orientação semelhante, apresenta-se de forma quase contínua, sendo interrompido por povoações instaladas onde antes estava presente o cordão, e em áreas onde a erosão provocou a destruição do mesmo (Figura 12).

Este cordão dunar frontal está a ocidente em contato com a praia alta (Figura 12). Pode apresentar dunas embrionárias resultantes da acreção ou estabilização da linha de costa adjacente, ou entrar em contato com a praia de forma abrupta, talhado em arriba, como resultado do caráter erosivo da costa. A oriente do cordão dunar está presente uma área de altitudes mais baixas e aplanada, frequentemente com depósitos de conchas fragmentadas e inteiras, que entra em contato a oriente com um vasto campo de dunas interiores fixas por pinhal (Figura 12).

O campo dunar interior resultou de uma formação descontínua e influenciada por variações nas condições climáticas, posição do nível mar, acarreio de sedimentos, cobertura vegetal e intervenções humanas (Danielsen, 2008a). Podem-se definir três gerações de dunas, descritas nos parágrafos seguintes.

A última geração inclui o campo dunar conhecido como Dunas de Quiaios. São dunas transgressivas que se estendem desde Quiaios até Mira (Figura 9), com cristas, em geral, de orientação leste – oeste. Acredita-se que sua formação esteja relacionada com as condições climáticas presentes durante a pequena idade do gelo (*Little Ice Age*) (André, 1996; Danielsen, 2008a; André *et al.*, 2009). Atualmente o campo dunar está coberto com uma floresta de pinhal, remontando uma época em que o avanço das dunas para as áreas cultivadas a leste levou a população a um esforço no plantio desta vegetação para a fixação dunar. Esta fixação foi realizada pelos Serviços Florestais, tendo início em 1924. No ano 1958, o campo de dunas interiores já se apresentava densamente florestado (Castilho, 2008). A estratigrafia desta região indica períodos intercalados de invasão eólica e níveis pedogénicos (podzol). Os períodos de invasão eólica estão associados com areias de dunas, enquanto os níveis de podzol associados a épocas mais estáveis intercalares que possibilitaram o desenvolvimento de uma cobertura vegetal (Danielsen, 2008b).

A segunda geração está preservada em forma de dunas parabólicas, numa área mais ao sul, entre a última e a primeira época de geração de dunas (Figura 9).

A primeira geração compreende um campo de dunas mais antigas, situadas a leste, provavelmente de deposição plistocénica), de morfologia mais esbatida. A rede de drenagem já está bem definida, e nela se desenvolve uma intensa actividade de cultivo, normalmente referida como planície de Gândara (Almeida, 1995) (Figura 9).

2.4 Enquadramento climático

A área apresenta um clima influenciado pelo Atlântico, o que favorece temperaturas amenas durante todo o ano (Danielsen, 2008a). A seguir, são apresentados dados climáticos obtidos através das normais climatológicas disponibilizadas pelo Instituto de Meteorologia, com base numa série histórica da estação climatológica de Aveiro entre os anos 1971 e 2000 (Lat.: 40°38'N; Lon.: 08°39'W). A temperatura média variou entre 20,2 °C no verão, e 10,2 °C no inverno. O maior valor da temperatura registado foi de 39 °C no mês de Julho e o menor de -3 °C no mês de Dezembro. A precipitação apresenta valor da média da quantidade total máxima de 131,9 mm em Dezembro, e mínimo de 11,8 mm em Julho, demonstrando uma época chuvosa, especialmente entre Outubro e Março, e um verão seco entre Junho e Agosto.

O regime de ventos está associado com uma circulação atmosférica de larga escala e de brisas locais que apresentam variações diurnas. A circulação de larga escala tem origem no contraste térmico entre as massas de ar polar do continente e as massas de ar tropical marítimo (MAOT, 2010). Ferreira (1993), com base em normais climatológicas publicadas em 1970, concluiu que os constantes ventos de norte (nortada) apresentam intensidades moderadas, e são interrompidos por eventos de calma frequentes no verão, e por ventos de maior intensidade de direcção sudoeste e sul no inverno.

Um estudo da variabilidade da circulação atmosférica (entre 1948 e 2008) é apresentado por Lorenzo *et al.*, (2011) para a região noroeste da península Ibérica. Estes autores relacionam a frequência de ocorrência a dez principais tipos de circulação (NE, E, SE, S, SW, W, NW, N, Anticiclónico e Ciclónico). É possível identificar a variação sazonal da circulação, a qual durante o Inverno predominam os ventos de W e SW e durante o verão os predominam os ventos de NW, N, NE e W. O Outono apresenta circulações semelhantes ao Inverno, enquanto a Primavera é caracterizada pela mistura entre as circulações do Inverno e Verão (Figura 14).

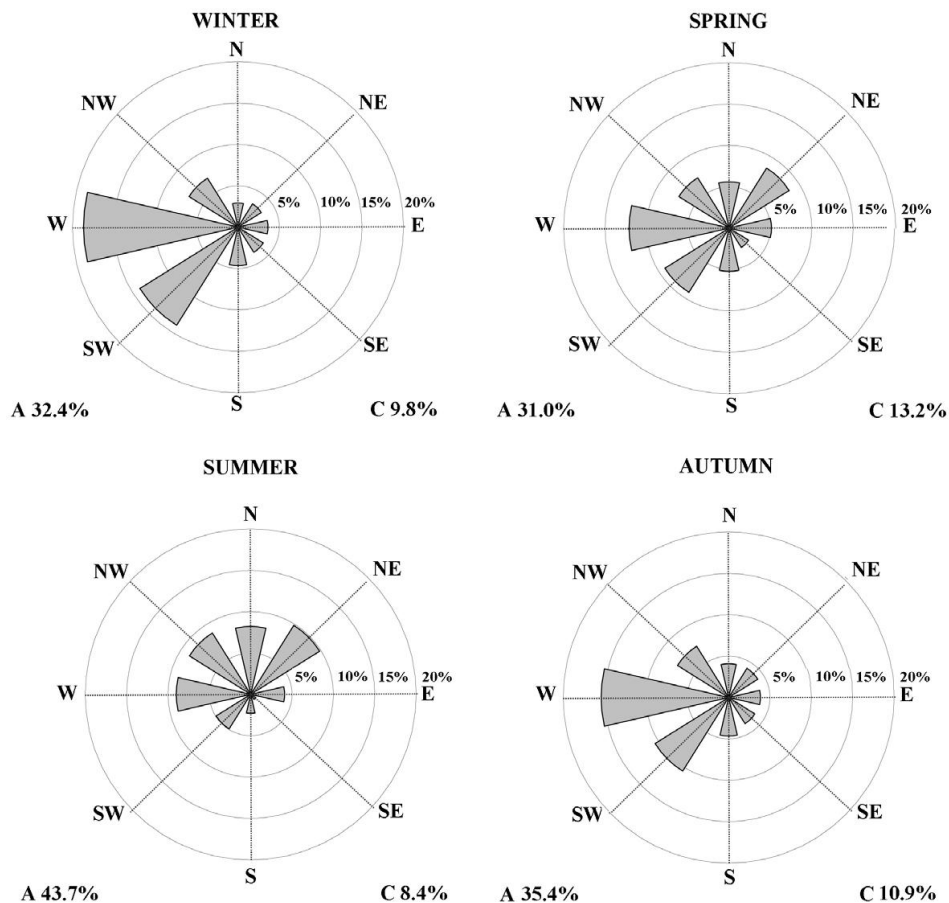


Figura 14: Frequência média (%) dos tipos de circulação durante o Inverno, Primavera, Verão e Outono, bem como a frequência das circulações Anticiclónicas (A) e Ciclónicas (C) (Lorenzo *et al.*, 2011).

2.5 Marés

As marés têm comportamento semi-diurno. Com uma variação vertical entre os 3 m durante condições de marés vivas, e pouco inferior a 1 m nas marés mortas (Ferreira, 1993), a área de estudo pode ser considerada como uma zona mesomareal. Com base na consulta da tabela de marés previstas para o ano de 2011 no porto de Aveiro, as marés apresentam uma amplitude mínima cerca de 0,5 m e amplitude máxima cerca de 3,5 m (Instituto Hidrográfico). Teixeira (1994) apresentou resultados da reconstituição da altimetria da maré quanto aos seus níveis notáveis para a barra de Aveiro, com valores próximos aos supracitados. O nível médio da maré adotado é de aproximadamente +2mZH (Teixeira, 1994; Cunha & Dinis, 1998).

A amplitude da maré tem efeitos importantes na dinâmica das praias estudadas, especialmente quando as marés vivas estão associadas à ocorrência de tempestades e a uma sobre-elevação do nível do mar local, o que acentua os riscos de erosão da costa. Quanto às correntes de maré, podem ser significativas ao largo de desembocadura de rios,

respectivamente na área envolvente ao canal artificial de ligação entre a laguna de Aveiro e o mar, estabilizado pelos molhes de Aveiro.

2.6 Clima de agitação marítima

Considerando as condições energéticas impostas pelo mar, as ondas são as forças dominantes nos processos litorais desta costa. O regime de ondas é resultado das frequentes tempestades no Atlântico norte (condição de *Swell*), e dos predominantes ventos de noroeste (geram vagas), podendo se alternar com ondas formadas por tempestades de sudoeste (Paillard *et al.*, 2000). Segundo Cunha & Dinis (1998), as ondulações de noroeste estão associadas com o anticiclone localizado próximo dos Açores, enquanto que ondulações de oeste e de sudoeste são geradas em condições de superfícies frontais.

Uma análise com base em dados de agitação marítima (Setembro de 1986 a Dezembro de 1993) ao longo da costa Portuguesa contemplou três estações permanentes, das quais uma se localiza em águas profundas ao largo de Figueira da Foz (Costa, 1994). Instalada em Julho de 1990 e com uma série de dados com cerca de três anos, esta estação permitiu algumas conclusões sobre a agitação marítima local. A altura significativa apresenta média mensal oscilando entre 1,1 e 2,6 m, período médio entre 5 e 8 segundos, e períodos de pico entre 8 e 13 segundos. A autora ressalta que é na Figueira da Foz onde são encontradas ondas com maiores alturas significativas durante todo o ano, em especial para ondas que excedem os 3 m de altura, ocorrendo em 28 % do período de inverno. Para elucidar as condições de agitação marítima mais energéticas, foi apresentada a distribuição de frequência relativa da direcção média associada ao período de pico. Na análise de todos os registos, 73% das ondulações observadas eram de noroeste. Ainda é apresentada a direcção das ondas com período de pico maiores que 3 m e 5 m, apresentando respectivamente 79% e 94% das observações.

Os temporais na costa oeste Portuguesa ocorrem quando a altura significativa das ondas ultrapassa os 5 m. É no inverno que ocorre o maior número de dias de temporal, com destaque para os meses entre Novembro e Março (Costa, 1994). Durante o período de análise para Figueira da Foz, foram registados 34 dias com temporal, dos quais os mais energéticos são de noroeste e do quadrante oeste – noroeste, com a ocorrência de alturas significativas superiores a 8 m. Os temporais que mais se fazem sentir em Figueira da Foz são os do quadrante N-NW, NW, NW-W e W, com predominância dos temporais provenientes de NW e W – NW (Costa, 1994).

2.7 A dinâmica sedimentar litoral

A dinâmica sedimentar na costa oeste portuguesa é essencialmente controlada por uma deriva litoral para sul. No segmento Aveiro – cabo Mondego o transporte sólido de norte para sul é facilmente verificado pela grande acumulação de areias junto ao molhe norte de Aveiro (Figura 10), além de em outras estruturas fixas perpendiculares ao longo da linha de costa (Ferreira, 1993; Veloso-Gomes, 2004).

Ferreira (1993), com base numa pesquisa bibliográfica sobre a carga da deriva litoral, estimou que o volume total apresenta valor entre $1 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ e $2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$, ressaltando o fato de que este valor pode estar subestimado pelo fato dos molhes não serem capazes de reter totalmente o transporte litoral.

Teixeira (1994) estimou que o transporte sólido longilitoral pela ondulação tem a capacidade de carga de $1,8 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$, muito abaixo da carga esperada para cessar a erosão ocorrente no troço Espinho – Cabo Mondego, de $2,5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$, valor este que compensaria a perda por transferência de sedimentos para a plataforma continental. Também cabe aqui apresentar o efeito negativo das intervenções humanas realizadas nos cursos fluviais que desaguam na costa oeste Portuguesa, que outrora, participavam mais activamente no aporte sedimentar, contribuindo para um maior transporte litoral (Veloso-Gomes & Taveira-Pinto, 2003). Dentre estas intervenções estão: a artificialização de margens, reduzindo o aporte sedimentar; a construção de barragens, afectando o caudal e o acarreo de sedimentos; a extração de areias dos leitos dos rios; operações de dragagens para melhoria da navegabilidade, em especial na foz de grande rios (como no rio Douro). Além destes factores, se discute ainda o aumento do nível do mar, que acredita-se estar a contribuir para a erosão em regiões costeiras (Veloso-Gomes & Taveira-Pinto, 2003).

Conforme a discussão acima, é de fácil entendimento o efeito erosivo em faixas costeiras. A redução do transporte litoral pela incompetência dos rios e retenção temporário de sedimentos a barlar de obras de engenharia costeira (nomeadamente molhes portuários e esporões) causam um balanço sedimentar negativo. Como consequência, sedimentos são removidos das praias e dunas, resultando no recuo da linha de costa, muito discutida em vários setores da margem continental oeste Portuguesa.

2.8 Evolução da linha de costa

O deslocamento da linha de costa em direção ao oriente que ocorreu a partir do último máximo glacial (~18.000 anos B.P.) apresentou estágios relacionados com períodos de estabilização da posição do nível do mar (Rodrigues & Dias, 1989). Estes estágios foram identificados através de elementos morfológicos ao longo da plataforma continental portuguesa, associados a fenómenos de ajustamento isostático e modificações climáticas de grande amplitude (Rodrigues & Dias, 1989). Estes mesmos autores identificaram, na plataforma continental ao norte do cabo Mondego, paleolinhas de costa localizadas às cotas atuais de -100/110 m, -60 m e -40 m. Estas paleolinhas de costa foram referidas a épocas estacionárias da lenta subida do nível do mar, que se iniciou com a deglaciação, há ~16.000 atrás.

Esta subida do nível do mar, conhecida por transgressão flandriana ou transgressão holocénica, teve seu máximo há 4300 anos B.P. (Danielsen, 2009). Dias (1987), refere que a cota actual do nível do mar na plataforma continental Portuguesa foi atingido entre os 5.000 e 3.000 anos B.P. O fato do nível relativo do mar ter se estabilizado, facilitou o retrabalhamento dos sedimentos na região costeira, possibilitando a construção de um cordão litoral, o assoreamento de zonas estuarinas e formação de restingas arenosas (Rodrigues & Dias, 1989; Danielsen, 2008b).

Danielsen (2009) apresenta um modelo das fases de evolução para a região litoral entre Quiaios e Palheiros de Tocha (Figura 15), no qual se verifica a formação de um sistema lagunar protegido por uma barreira (~4000-4100 B.P.). A linha de costa progredia em direção ao mar, e esta laguna foi assoreada. Um aumento na intensidade da atividade eólica e a formação das lagoas Vela e Braças ocorreu cerca dos 1600 B.P. A formação das dunas transversas foi facilitada pela degradação da vegetação e pela consistência da forte atividade eólica, o que também causou um deslocamento das lagoas para leste devido ao seu preenchimento pelas areias transportadas (há ~300 anos atrás). O fim desta evolução é representado pela completa reflorestação do campo dunar e a estabilização do mesmo (decorrida entre 1924-1940).

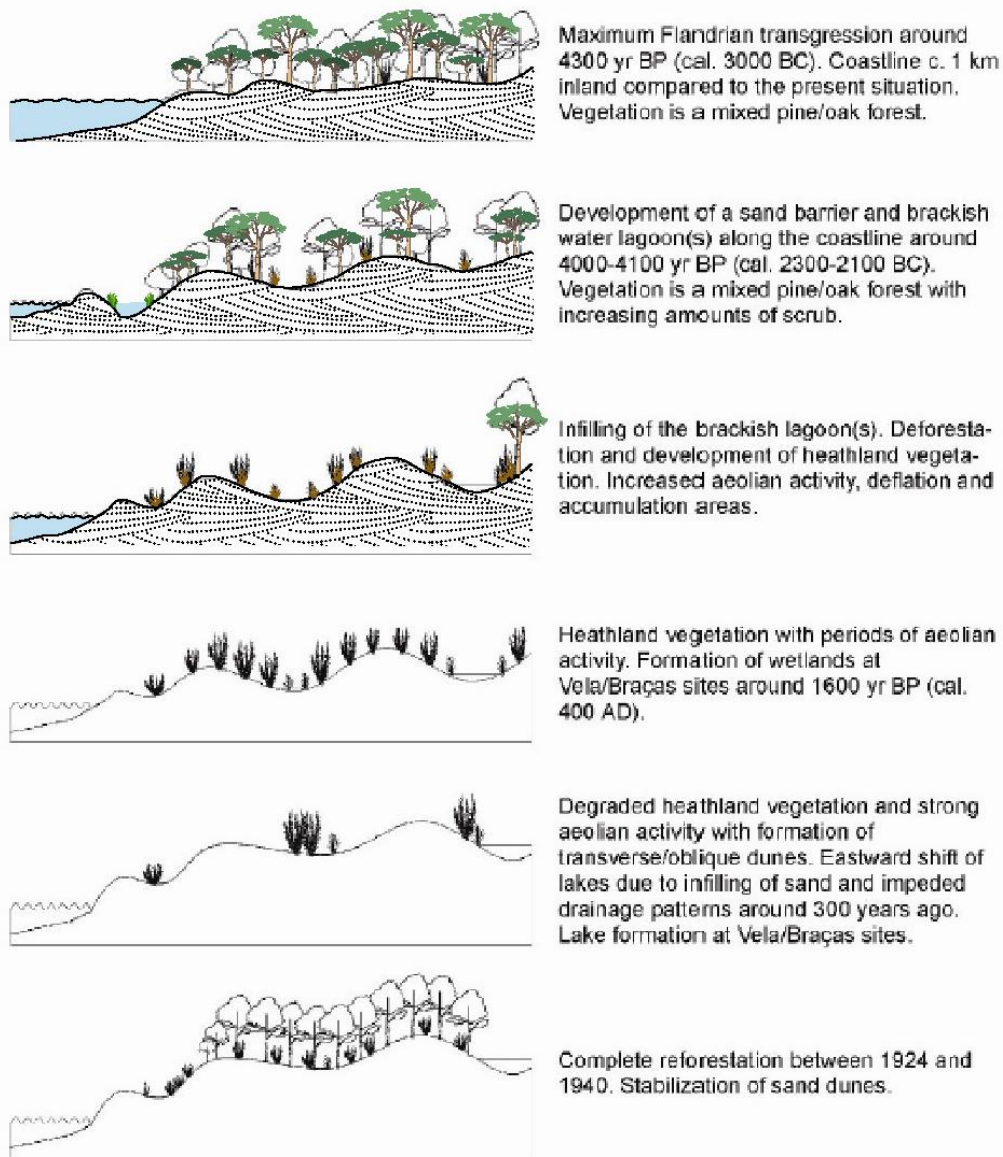


Figura 15: Modelo das fases evolutivas para a planície costeira entre Quiaios e Palheiros de Tocha desde a transgressão Flandriana. Fases descritas no texto (Adaptado de Danielsen, 2009).

Com base em geofísica e sondagens, Castilho (2008) definiu unidades sedimentares na planície costeira entre Quiaios e Palheiros de Tocha (Figura 16). No sector ocidental da área, a autora identificou litofácies com características de ambientes de praia e ambientes lagunares, sobrepostos por uma camada mais espessa de areias eólicas. A sequência de unidades sedimentares neste sector ocidental apresenta na base “Areias Grosseiras com Conchas”, cujas características ligam a um ambiente de praia. Este pacote apresenta espessura máxima de 9 m conforme um furo no sul da área. A litofácies “Lodos cinzentos com conchas” caracterizada por intercalações finas de níveis lodosos, silto-argilosos, com

níveis de areia fina a média são encontrados acima da unidade anterior, paralelamente à linha de costa actual, com limite oriental localizado a uma distância entre 800 e 1000 m da mesma. Tem espessura que varia entre o decímetro até 2 m. Suas características indicam um ambiente lagunar, em especial os pólenes, algas, moluscos e bivalves. No topo desta sequência estão as “Areias de Cor Clara”, que dentre as suas características, são quartzosas, bem calibradas a moderadamente calibradas, de granulometria fina a média e com elevada maturidade textural, típicas de areias eólicas. Recobrem grande parte da área de forma bastante homogénea, apresentando espessura de alguns decímetros (a norte e oriente) a dezenas de metros, onde a máxima (30 m) foi registada na zona central da área, e sob as cristas dunares mais elevadas.

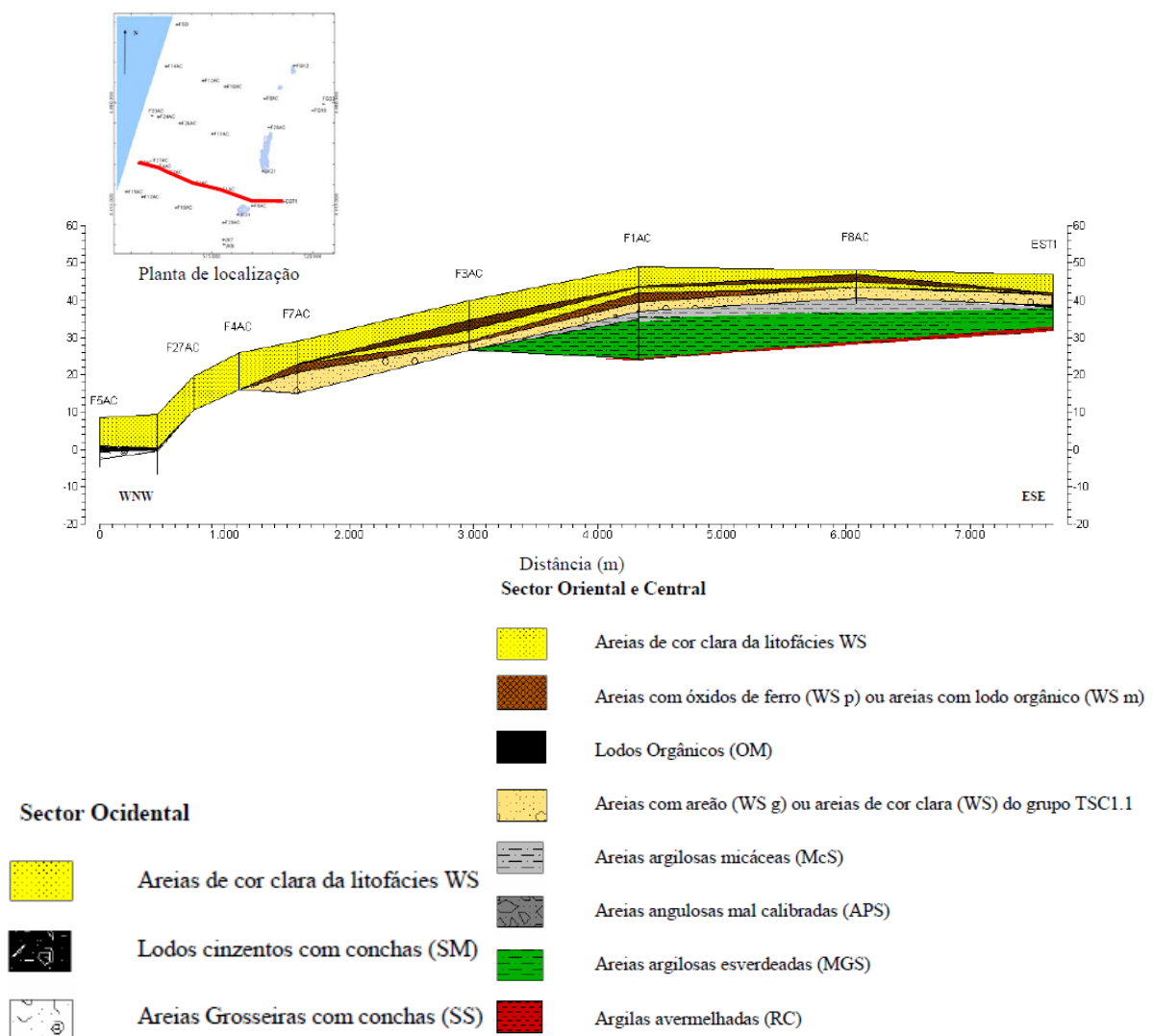


Figura 16: Distribuição dos setores e litofácies de um perfil geológico perpendicular a linha de costa. Este perfil foi realizado com base em geofísica e furos de sondagens na planície costeira entre Quiaios e Palheiros de Tocha (Castilho, 2008).

Estas unidades permitiram concluir que a linha de costa encontrava-se aproximadamente a 1 Km para oriente de onde se encontra actualmente, contemporânea a época da formação da unidade “Areias Grosseiras com Conchas”, relacionada com um ambiente do tipo barreira, sendo a unidade “Lodos cinzentos com conchas” relacionados a um ambiente do tipo laguna. A laguna sofreu um enchimento sedimentar, seguido pelo avanço da linha de costa em direção ao ocidente, até cerca da posição actual, uma progradação local da linha de costa (Castilho, 2008).

2.9 Evolução recente da linha de costa

Os estudos da evolução recente da linha de costa realizados no troço costeiro entre a barra de Aveiro e o cabo Mondego incidem sobre a segunda metade do século XX (Ferreira & Dias, 1992; Ferreira, 1993; Teixeira, 1994). Nestes trabalhos é possível verificar a tendência erosiva na parte mais meridional deste troço, relacionada com uma maior influência dos molhes portuários de Aveiro na regressão da linha de costa.

Ferreira e Dias (1992) e Ferreira (1993) desenvolveram seus estudos com base em coberturas de fotografia aérea dos anos de 1947, 1958, 1970, 1973, 1980 e 1990. Dentre os indicadores de linha de costa possíveis a serem utilizados, os autores optaram pelo contacto entre a praia e a duna. Os autores alegam que este indicador não está sujeito às variações diurnas da maré (como ocorre com o indicador seco-molhado), e que a base das dunas é frequentemente atingida pelo mar em condições mais energéticas. Além disso, é considerado um indicador confiável para uma análise decadal da evolução da linha de costa, especialmente em locais onde a erosão é predominante. Em casos onde a costa apresenta acreção, a base das dunas pode não indicar fielmente a evolução, já que sua progradação ocorre de forma mais lenta (Ferreira, 1993).

Ferreira (1993) dividiu o troço costeiro entre a barra de Aveiro e o cabo Mondego em 8 sectores, apresentando taxas médias de erosão para cada sector a partir de um conjunto de transectos com espaçamento de 275 m. Foi possível verificar a influência dos molhes portuários de Aveiro, causando uma forte regressão da linha de costa, com destaque para os primeiros dois sectores, Barra-Costa Nova do Prado e Costa Nova do Prado-Vagueira (Figura 8), com valores extremos de -6.3 m/ano do último sector entre os anos de 1958 e 1970 (Tabela 2) (Nota: por convenção, os valores negativos representam regressão da linha de costa, enquanto os positivos acreção). A redução da regressão nos anos seguintes nestes dois primeiros setores foi associada à construção de estruturas de defesa costeira (esporões e enrocamentos longilitorais. Em relação aos sectores mais meridionais, se verificaram tendências evolutivas semelhantes nas últimas décadas, com predominância

para uma linha de costa em equilíbrio dinâmico, ou começo de uma erosão, resultante da propagação da frente de erosão para sul, pela análise da ligeira regressão ocorrida durante os anos finais do estudo (Ferreira, 1993).

Tabela 2: Taxas médias (m/ano) de evolução da linha de costa entre a Barra de Aveiro e o cabo Mondego. Adaptado de Ferreira (1993).

Sector	1947/1958	1958/70	1970/80	1980/90	Média
Barra - C.N. Prado	-4.6	-4.3	-4.4	4.5	-2.2
C.N. Prado - Vagueira	-1.5	-6.3	-3.8	-3.7	-3.8
Vagueira - P. Areão	-0.1	-1.6	-2.4	-3.9	-2
P. Areão - P. Mira	-	-1.3	-1.4	-1.8	-1.5
P. Mira - C. Marco	-0.1	-1.1	-1	-1.2	-0.9
		1958/73	1973/80		
C. Marco - P. Tocha	+1.5	+1	+0.5	+0.2	+0.8
P. Tocha - Costinha	-	+0.7	+1.2	0	+0.6
Costinha - C.Mondego	-	+0.8	+0.3	+0.1	+0.4

Em Ferreira (1993) são apresentadas previsões da evolução das taxas da linha de costa para os 25 anos seguintes a 1990, utilizando-se de uma reta de regressão linear. Esta extrapolação revelou uma tendência geral de recuo da linha de costa, inclusive para os sectores mais ao sul. O sector que sofreria uma maior erosão (-7.2 m/ano) seria aquele entre Vagueira e Praia do Areão, no ano de 2015 (Tabela 3).

Tabela 3: Tendência evolutiva e previsão da evolução da linha de costa (m/ano) entre os anos 1990-2015 após método de regressão linear (modificado de Ferreira, 1993).

Sector	1980/1990	2000	2015
Vagueira - P. Areão	-3.9	-5.5	-7.2
P. Areão - P. Mira	-1.8	-2.1	-2.5
P. Mira - C. Marco	-1.2	-1.8	-2.2
C. Marco - P. Tocha	+0.2	-0.4	-1
P. Tocha - Costinha	0	-0.2	-0.6
Costinha - C.Mondego	+0.1	-0.5	-1
Taxa Média	-1.1	-1.8	-2.4

Com base nestas taxas de evolução e na largura do cordão dunar frontal, Ferreira & Dias (1992) estipularam que a erosão é capaz de destruir 42% destes corpos sedimentares entre Barra de Aveiro e o cabo Mondego até o ano de 2020 (12% de destruição já em 1990),

com sua destruição total entre Barra de Aveiro e Praia do Areão (Figura 8). O sector entre Praia do Areão e Praia de Mira também seria muito afetado (68%), enquanto o sector sul, até o cabo Mondego seria o menos afectado (7%). No setor sul, a destruição ocorreria especialmente num troço a barlamar dos esporões de Praia de Mira. Como resultado disso, os autores consideraram a possível ocorrência de inundações destrutivas, colapso de edifícios e estradas, ou contaminação por água salina de solos cultivados e de aquíferos em locais onde o cordão dunar fosse mais afetado. Frente a estes fatos, os autores também cogitaram a instalação futura de estruturas de defesa costeira, o que reduziria a regressão da linha de costa localmente e a redução da destruição das dunas.

Teixeira (1994), no estudo da evolução do litoral entre Espinho e o cabo Mondego, adotou como indicador da linha de costa o nível médio da água (+2m ZH) Este trabalho teve como base informações cartográficas e fotografia aérea, o que possibilitou um estudo mais alargado temporalmente com dados que datam desde 1870 (levantamento de 1866/70 de F. Folque, Direcção geral dos Trab. Geod. Top. Hydrog. E Geol. Do Reino, na escala de 1/100.000) até fotografias aéreas e ortofotos mais recentes (1989). Em todo o troço costeiro foram identificados 6 sectores com características em comum, nomeadamente nas modificações da direcção da linha de praia, e de limites relativamente estáveis a pelo menos 100 anos. Com base nestes setores, o autor apresentou taxas da evolução da linha de costa, com foco entre os anos 1947 e 1989, descritas a seguir.

Para o sector entre Espinho e Furadouro, há registos de erosão desde o século XIX, porém a construção de defesas costeiras reduziram localmente a taxa de recuo da linha de costa, que para o início dos anos 90 não ultrapassava -1 m/ano. Entre Furadouro e São Jacinto há uma tendência erosiva, especialmente a partir da década de 50, que mesmo após obras de intervenção, não foi atenuada, apresentando uma taxa aproximada de -3 m/ano em 1988.

Para sector adjacente ao molhe norte de Aveiro, denominado pelo autor como Zona de acumulação de São Jacinto (Figura 8), houve uma evolução particular, diretamente associada com as obras naquele molhe. A análise anterior a 1973 foi baseada em um estudo anterior realizado Hidrotécnica Portuguesa. Notou-se uma forte acumulação de areias durante o início dos anos 50, causada pelas obras do molhe norte, evidenciada pela taxa de migração do litoral em direcção ao mar de aproximadamente +13 m/ano, até 1954. A partir daí, a velocidade de construção do molhe foi reduzida, com reflexo na redução da taxa de migração até o ano de 1958 (cerca de +2 m/ano). De 1958 até fim dos anos 70 a zona de acumulação foi reforçada (alcançou valores cerca de +6 m/ano em 1965). A taxa de migração do litoral é invertida após o ano de 1985/86, a qual passa a caracterizar um litoral

em regressão até 1989 (valores cerca de -12 m/ano). Esta inversão foi relacionada com um incremento na extração de areias da praia e o prolongamento do molhe norte, que adquiriu uma nova orientação e facilitou a transposição longilitoral das areias para sul, alimentando o delta de vazante da barra de Aveiro e a costa a sul.

Teixeira (1994) dividiu o segmento entre os molhes de Aveiro e o cabo Mondego em três setores. O primeiro sector entre a Barra de Aveiro e Costa Nova do Prado apresentava taxas erosivas cerca de -8 m/ano com o prolongamento do molhe norte, valor este que foi reduzido para cerca de -4 m/ano a partir do crescimento do delta de vazante. A erosão deste troço levou a instalação de um campo de esporões, e no final da década de 80, a costa já se apresentava estabilizada, também sendo alimentada artificialmente pelas areias dragadas da barra de Aveiro, apresentando uma acreção cerca de +1 m/ano. O sector entre Costa Nova do Prado e o Canto do Marco mostrava comportamento em recuo erosivo desde os anos 50, o que levou durante a década de 70 a construção do esporão de Vagueira (realizada em 1978 segundo o autor), e a instalação do campo de esporões e defesas aderentes no sul da população de Costa Nova do Prado.

Capítulo III - Material e Métodos

Foram selecionadas várias coberturas de fotografias aéreas verticais, trabalhadas em um ambiente de sistema de informação geográfico (ArcMap™ versão 9.3), sobre as quais foi realizada a extração da linha de costa. As fotografias aéreas são reconhecidas como principal fonte de dados para estudos da evolução da linha de costa envolvendo vários anos, (Boak & Turner, 2005; Crowell *et al.*, 1991; Moore, 2000; Thieler & Danforth, 1994). Adicionalmente, foi realizada uma campanha de cartografia da linha de costa com o auxílio de um veículo motorizado, equipado com GPS diferencial em modo RTK. O material utilizado e os métodos seguidos para a aquisição dos dados deste presente estudo serão descritos a seguir.

3.1 Coberturas de fotografias aéreas verticais

As fotografias aéreas apresentadas foram compiladas de diversas fontes. As fotografias fornecidas apresentavam-se em diferentes formatos, necessitando de diferentes tratamentos antes de ser utilizadas para a extração de linhas de costa. As coberturas utilizadas neste estudo são referentes aos anos 1958, 1970, 1973, 1974, 1995, 1998 e 2007 (Figura 17). Existem outras coberturas de fotografia aérea para a área em estudo (1947,

1980 e 1990), as quais não foram possíveis de serem acedidas. Porém, as fotografias utilizadas satisfazem a análise da evolução da linha de costa ao longo dos quase cinquenta anos já que muitos autores consideram que apenas quatro posições de linhas de costa são suficientes para tal estudo (Addo *et al.*, 2008).

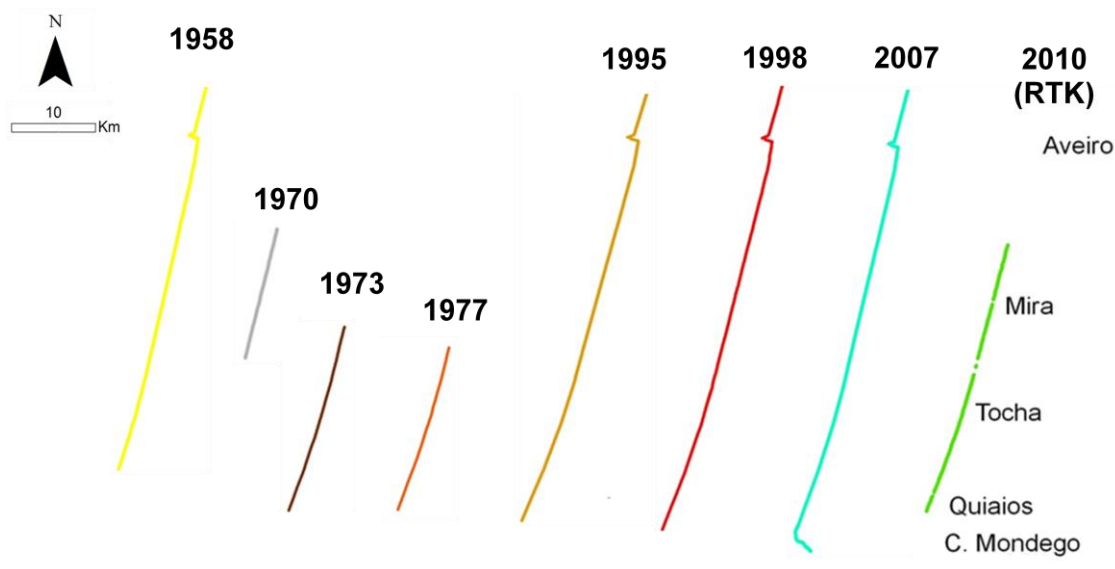


Figura 17: Segmentos costeiros entre o cabo Mondego e Aveiro abrangidos pelas coberturas de fotografia aérea (1958, 1970, 1973, 1977, 1995, 1998, 2007) e pela cartografia com RTK-GPS equipado em um veículo todo-terreno (2010).

3.1.1 Fotografias aéreas de 1958 (Voo USAF)

As fotografias referentes ao ano de 1958 foram tomadas em 13 e 14 de Junho em uma campanha da Força Aérea Americana, abrangendo toda a área de estudo. A preto e branco e com uma escala aproximada de 1/26.000, estas fotografias foram fornecidas pelos Serviços Geológicos de Portugal (atual Laboratório Nacional de Energia e Geologia) em formato de papel fotográfico. Para o estudo foram utilizadas 10 fotografias.

3.1.2 Fotografias aéreas de 1970

As fotografias aéreas de 1970 foram fornecidas pelo Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) em formato digital (TIFF), a preto e branco, com escala de 1/25.000. Esta cobertura é constituída por 7 fotografias, abrangendo a área do sul da Praia de Mira até os molhes de Aveiro.

3.1.3 Fotografias aéreas de 1973

As fotografias aéreas de 1973 foram fornecidas pelo IGeoE em formato digital (TIFF), a preto e branco, com escala de 1/25.000. Esta cobertura constitui-se de 7 fotografias entre Quiaios e o sul de Praia de Mira.

3.1.4 Fotografias aéreas de 1977

A cobertura de fotografias do ano de 1977 foi fornecida pelo IGeoE em formato digital (TIFF), a preto e branco, com escala de 1/26.500. Cinco fotografias, tomadas em Abril deste mesmo ano, abrangem a área entre o cabo Mondego e o norte de Palheiros de Tocha.

3.1.5 Ortofotomapas de 1995

Esta cobertura de ortofotomapas (fotografia aérea após remoção das distorções introduzidas no processo fotográfico) foi fornecida pelo Instituto Geográfico Português (IGP) no formato MrSID (método de compressão de alta performance e qualidade de ficheiros do formato raster). As oito ortofotomapas utilizadas estavam associados ao sistema de referência Datum-Lisboa (este sistema já está obsoleto), a cores e com escala aproximada de 1/15.000, abrangendo toda a área de estudo.

3.1.6 Ortofotomapas de 1998

A cobertura utilizada deste ano foi fornecida pelo IGeoE (fotografias entre o cabo Mondego e Palheiros de Tocha tomadas em Maio) e pelo IGP (fotografias entre Palheiros de Tocha e Aveiro). Os ortofotomapas disponibilizados pelo IGeoE encontravam-se no formato TIFF, sem nenhum sistema de coordenadas associado. As fotografias pertencentes ao IGP apresentavam-se no formato ECW (*Enhanced Compressed Wavelet*, método de compressão de imagens que permite grande capacidade de processo e alta qualidade de visualização), referenciadas no sistema do Datum-Lisboa.

3.1.7 Ortofotomapas de 2007

Esta cobertura é um conjunto de fotografias digitais de alta resolução (50 cm) disponibilizadas pelo IGP. As fotografias deste ano abrangem toda a área de estudo e apresentavam-se no formato TIFF e no sistema de coordenadas ETRS89.

3.2 Rasterização

Entende-se por processo de rasterização aquele através do qual se digitaliza uma fotografia aérea em formato de papel. Este processo deve resultar numa imagem digital final com a melhor qualidade possível tendo em conta os objetivos do trabalho, o que é de grande importância em estudos que visem a identificação de feições, estruturas, etc., ou seja, quando é necessário uma maior pormenorização da imagem.

A cobertura de fotografias de 1958 foi a única que necessitou de ser rasterizada. As fotografias referentes a este ano foram digitalizadas em um scanner da marca Mustek, modelo P3600 A3 PRO (Figura 18). Tendo em conta a relação entre a resolução da imagem, o tamanho final do ficheiro e o tempo de processamento, as fotografias foram digitalizadas em 256 níveis de cinzas com uma resolução de 1800 dpi (*dots per inch* ou pontos por polegada). Os ficheiros finais foram gravados no formato TIFF (*Tagged Image File Format*, formato de ficheiro gráfico bitmap).

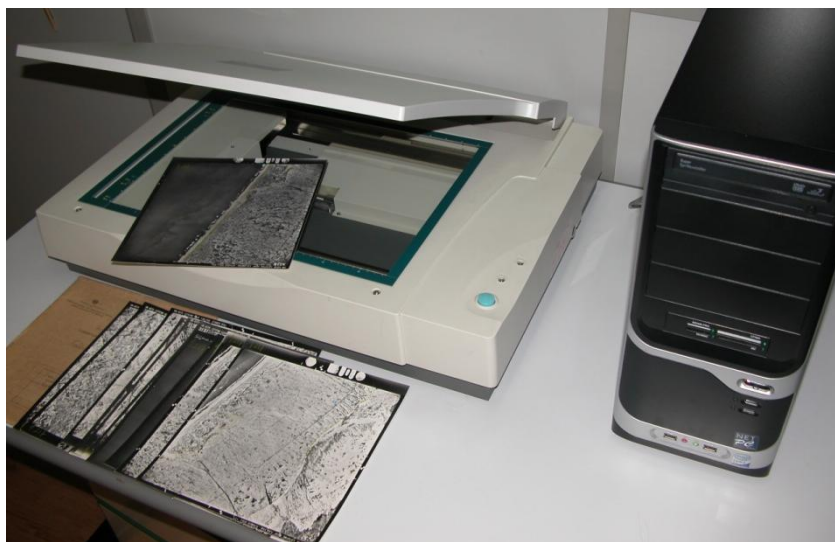


Figura 18: A cobertura de fotografia aérea em papel do ano de 1958 foi digitalizada com a utilização de um scanner Mustek, modelo P3600 PRO. Isto possibilitou a manipulação da fotografia, em formato TIFF, e o seguinte processo de georeferenciação.

3.3 Georeferenciação

Neste ponto, foi importante a escolha do sistema de coordenadas a ser utilizado. O Sistema escolhido para manipulação do material e dos dados foi o ETRS89 (*European Terrestrial Reference System*). Esta escolha foi baseada primeiramente na necessidade da utilização de um sistema de coordenadas projetadas em metros, um dos requisitos para a

aplicação da extensão DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) ao ArcMap (Thieler *et al.*, 2009) (ver Capítulo 3.5). Outro fator que levou à escolha do sistema ETRS89 foi o fato deste ser um sistema atual e global de referência, recomendado pela EUREF (*European Reference Frame*, subcomissão da IAG - Associação Internacional de Geodesia) (<http://www.igeo.pt>, consultado em 26 de Janeiro de 2011). As coberturas de fotografias dos anos 1995 e 1998, nomeadamente as fornecidas pelo IGP, foram transformadas do sistema de referência original para o sistema adotado neste estudo.

As fotografias aéreas que necessitaram de ser georeferenciadas foram as referentes aos anos 1958, 1970, 1973, 1977 e 1998. Para a atribuição do sistema de coordenadas, teve-se como referência os ortofotomapas do ano de 2007, pela razão destes já se apresentarem no sistema ETRS89. A utilização de um conjunto específico de fotografias já georeferenciadas, possibilita obter uma melhor relação espacial entre todo o conjunto de fotografias utilizadas no decorrer de um trabalho, essencial para estudos de fotogrametria (Thieler & Danforth, 1994). Este processo foi realizado mediante a prévia identificação de pontos comuns às fotografias aéreas 2007 e 1995, designados como pontos de controle (Thieler & Danforth, 1994). Os pontos de controle podem ser derivados de feições reconhecidas nas fotografias, como cruzamentos de estradas, prédios, vegetação, etc., e de pontos em que são conhecidas a suas posições em terra, extraídos de campanhas de campo (GPS) ou de mapas (Thieler & Danforth, 1994). Os pontos de controle possibilitam a sobreposição de uma imagem sem um sistema de coordenadas à outra com um sistema de coordenadas conhecido (Figura 19), através de uma matriz de transformação. A atribuição de pontos de controle através de feições comuns às fotografias é uma tarefa que necessita de uma grande precisão espacial e atenção do utilizador. Foram utilizados pontos dispersos por toda a fotografia, para satisfazer da melhor maneira o processo de georeferenciação e reduzir a introdução de erros espaciais (Crowell *et al.*, 1991; Thieler & Danforth, 1994; Ferraz, 2007). De acordo com Thieler & Danforth (1994), apenas alguns pontos de controle, cuja localização é reconhecida em campo, são necessários para estabelecer uma relação geográfica de um grupo de fotos, sendo complementados por outros pontos comuns que são reconhecidos diretamente entre as fotografias.

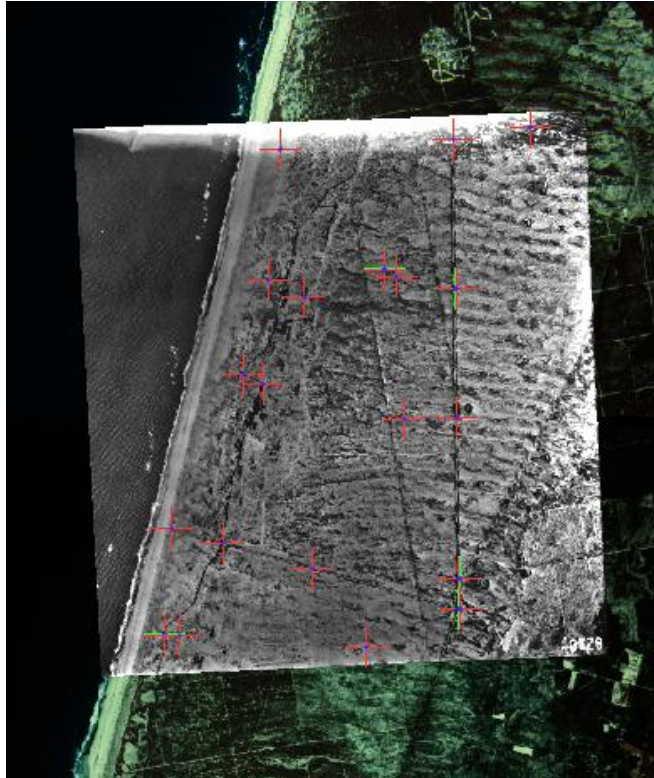


Figura 19: Um exemplo da atribuição de pontos de controle (cruzes vermelhas) durante o processo de georeferenciação. Neste caso, foram utilizados vinte pontos dispersos por toda a fotografia de 1958 na área de Palheiros de Tocha.

Para satisfazer esta ultima condição, foi realizado um levantamento para estipular posições geográficas de pontos em campo com a utilização de um GPS. Dez pontos de campo foram utilizados no processo da georeferenciação, porém só estão presentes na região entre Quiaios e Praia de Mira. Um levantamento mais consistente englobaria toda a área de estudo, mas isto não foi possível dada a sua grande dimensão.

Optou-se por realizar uma transformação polinomial de 3^a ordem a cada fotografia, permitindo um melhor ajuste espacial da imagem (Figura 20; Figura 21). Os erros associados a este ajustamento espacial das fotografias são representados pelo RMS (*Root Mean Squares*), que indica a média dos erros associados aos pontos de controle no processo de transformação. Os produtos da georeferenciação foram gravados em ficheiros TIFF para posterior manipulação. Nas tabelas (Tabela 4, 5, 6, 7 e 8) estão representados os valores dos RMS resultantes das transformações polinomiais (1^a, 2^a e 3^a ordem). A transformação de 3^a ordem foi utilizada por apresentar os menores valores do RMS, resultando no melhor ajuste espacial possível.

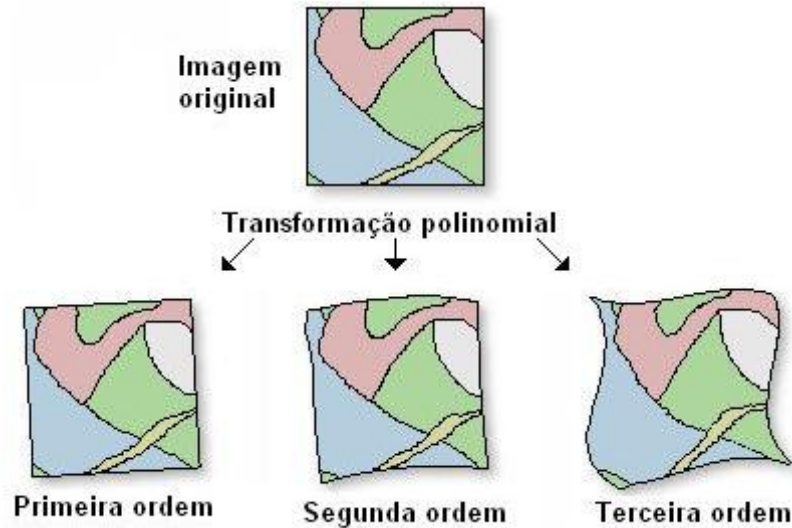


Figura 20: Ajuste espacial da imagem derivado da ordem de transformação polinomial. Quanto maior a ordem de transformação, mais complexo é o ajuste, permitindo uma melhor georeferenciação (ESRI, 2008)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual
7	5.027279	0.546039	-57371.307948	84482.018688	1.29772
8	0.948493	0.410185	-54504.205695	84729.982905	0.14279
9	2.366467	5.099553	-55340.651867	81387.662283	1.80337
10	5.519666	4.403550	-57573.184601	81779.049504	5.48614
11	5.827994	4.224335	-57791.887449	81890.040574	2.67623
12	3.435668	2.607787	-56176.721476	83091.086873	2.94884
13	3.260343	2.754899	-56048.023190	82997.656867	0.82598
14	4.857215	7.482625	-57004.015330	79648.449642	1.12473
15	3.228524	5.091137	-55940.830579	81365.869779	1.31397
16	4.774721	3.013968	-57102.935435	82768.093608	1.81743
17	5.337767	2.698539	-57512.847279	82963.108732	5.51699
18	2.212312	0.540336	-55385.474522	84589.987824	1.01918
19	4.044729	8.821073	-56395.614278	78743.612308	0.54115
20	2.285846	2.983408	-55354.703253	82868.843122	2.50919

Auto Adjust Transformation: 3rd Order Polynomial Total RMS Error: 2.70884

Figura 21: Tabela indicando a matriz de transformação de 3ª ordem, o erro residual de cada ponto de controle e o erro residual total (*Total RMS Error*) para uma fotografia aérea.

Tabela 4: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1958, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.

Ano	Fotografia	RMS (m)		
		1ª	2ª	3ª
1958	4018	9.71	4.54	3.47
	4014	8.22	5.09	3.62
	4016	6.24	4.02	3.54
	6207	3.92	3.46	2.94
	6208	4.67	3.22	2.70
	6210	7.95	4.31	2.71
	3145	11.91	6.09	3.09
	6206	20.87	7.12	3.07
	3147	4.51	3.46	2.91
	3149	4.58	3.51	2.66
	Média do erro (m)	8.26	4.48	3.07

Tabela 5: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1970, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.

Ano	Fotografia	RMS (m)		
		1 ^a	2 ^a	3 ^a
1970	2070	8.42	2.71	1.60
	2272	3.13	2.40	1.59
	2274	2.65	1.81	0.68
	2276	15.19	1.89	1.10
	2278	4.29	2.90	0.51
	2280	18.08	2.87	1.31
	2282	8.56	5.28	1.85
	Média do erro (m)	8.62	2.84	1.23

Tabela 6: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1973, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.

Ano	Fotografia	RMS (m)		
		1 ^a	2 ^a	3 ^a
1973	7545	26.26	13.13	2.45
	7546	17.33	13.54	1.50
	7548	5.13	3.30	1.63
	7550	10.81	2.64	0.58
	7552	6.80	2.22	1.15
	7556	13.21	4.25	2.19
	7558	8.64	3.64	1.28
	Média do erro (m)	12.60	6.10	1.54

Tabela 7: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1977, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.

Ano	Fotografia	RMS (m)		
		1 ^a	2 ^a	3 ^a
1977	3649	33.76	16.12	2.05
	3653	8.64	2.48	1.32
	3713	11.14	6.51	2.21
	4538	4.47	3.03	1.75
	4594	5.04	2.14	0.92
	Média do erro (m)	12.61	6.06	1.65

Tabela 8: Erro residual total (RMS) para cada fotografia da cobertura do ano de 1998, e a respectiva média para o conjunto de fotografias de acordo com a ordem de transformação polinomial.

Ano	Fotografia	RMS (m)		
		1 ^a	2 ^a	3 ^a
1998	8018	13.92	2.07	0.37
	8020	14.16	1.18	0.14
	8022	29.38	1.08	0.43
	8024	29.05	2.22	0.44
	8026	11.66	1.94	0.73
	8028	21.26	2.30	0.82
	8030	10.35	2.85	0.88
	8032	13.39	2.98	0.13
	8034	10.01	2.21	0.76
	8036	19.23	1.99	0.49
	8038	33.25	5.01	0.78
		Média do erro (m)	7.84	1.37

3.4 Cartografia da linha de costa

Para o presente estudo, foram adotados dois indicadores de linha de costa para a cartografia no troço costeiro entre o cabo Mondego e Aveiro. O primeiro foi o indicador representado pelo limite entre a praia e a duna, e o segundo o limite entre o seco e o molhado. Como foi discutido antes (Capítulo I), o indicador associado ao limite praia-duna apresenta uma boa resposta à evolução de médio termo de uma linha de costa. Além da escala temporal, este limite apresenta maior facilidade de identificação através das fotografias aéreas (Figura 22), principalmente naquelas mais antigas, com menor qualidade de imagem. Durante a cartografia do limite praia-duna, foi considerado o limite mais ocidental da vegetação dunar (Figura 12; Figura 22). Esta escolha entra em concordância com o indicador utilizado no estudo por Ferreira (1993), quem reconheceu que a mobilidade deste indicador tem relação com a evolução da linha de costa já que as dunas sofrem o ataque marinho durante épocas de condições mais energéticas e tendem também a acompanhar a migração da praia. A vegetação dunar da área de estudo é de fácil identificação e está presente em quase todo o troço costeiro, exceto na parte mais setentrional onde o cordão dunar frontal está degradado ou é inexistente (Figura 12).

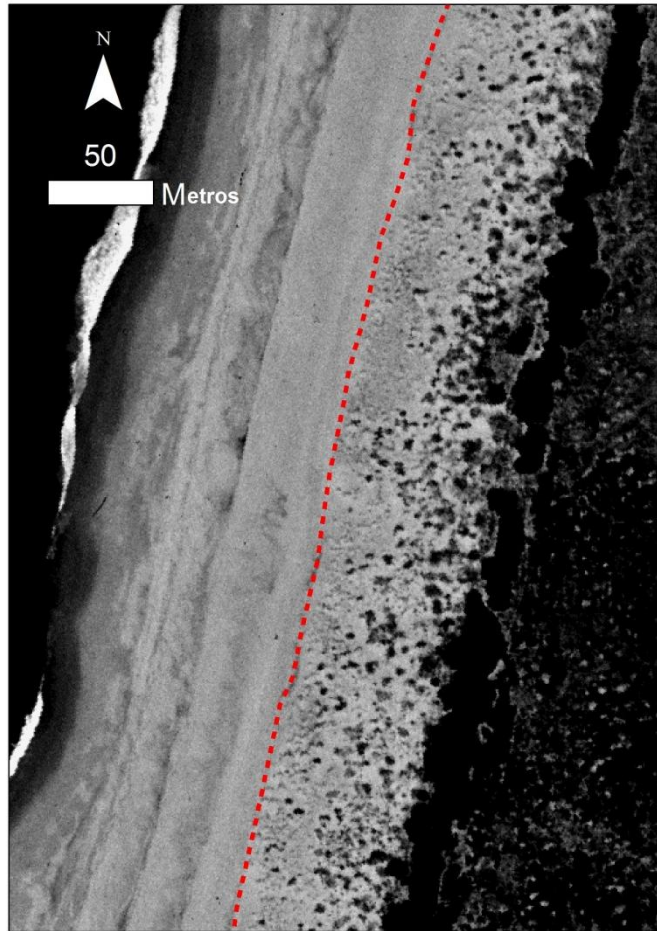


Figura 22: Exemplo do indicador de linha de costa representado pelo contato (tracejado vermelho) entre a praia alta e a vegetação dunar. Fotografia aérea de 1970 ao fundo (Fonte: IGeoE) de uma área entre Quiaios e Palheiros de Tocha.

O segundo indicador de linha de costa utilizado foi o limite entre o seco e o molhado, ou seja, o limite máximo alcançado pela água durante a fotografia aérea, representado pela clara mudança de contraste na imagem (Figura 23). Os limites associados a linha da água apresentam grande mobilidade já que estão associados aos efeitos do espraiamento das ondas na praia, e à variação do nível de água relativo devido as marés, e ventos. Como consequência, este indicador induz a maiores erros na cartografia da linha de costa (Thieler & Danforth, 1994). No entanto, pode ser útil em locais onde o limite praia-duna não é possível de ser mapeado (má visualização da feição, ou a sua não ocorrência), em zonas de baixa amplitude mareal e em praias com pendentes muito inclinadas. O limite entre o estrão e a berma poderia ser utilizado como um indicador alternativo, porém a dificuldade da sua visualização em todas as coberturas fotográficas não permitiu a sua aplicação.

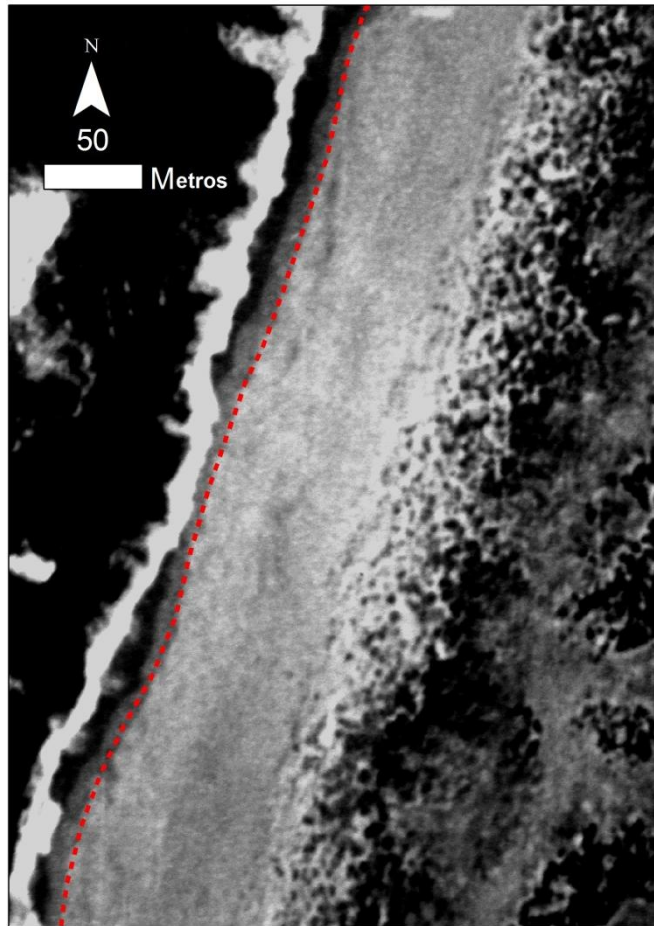


Figura 23: Exemplo do indicador de linha de costa representado pelo limite entre a areia seca e a areia molhada (tracejado vermelho). Ao fundo uma fotografia do ano de 1958 (Fonte: LNEG) de uma área ao sul de Palheiros de Tocha.

3.4.1 Cartografia através da análise de coberturas de fotografias aéreas

As linhas de costa foram extraídas das fotografias aéreas em ambiente SIG onde os indicadores de linha de costa foram identificados e mapeados em forma de vectores (Figura 24). Estes vectores foram guardados em uma *Personal Geodatabase* como *shapefiles* de linhas, conforme recomendado por Thieler *et al.* (2009) para a sua utilização no DSAS. Estes *shapefiles* foram associados ao sistema de coordenadas ETRS89. O avanço da tecnologia tornou as plataformas de SIGs em poderosas e acessíveis ferramentas para a manipulação de largas quantidades de dados, com grande favorecimento na visualização e análise espacial dos mesmos (Moore, 2000).

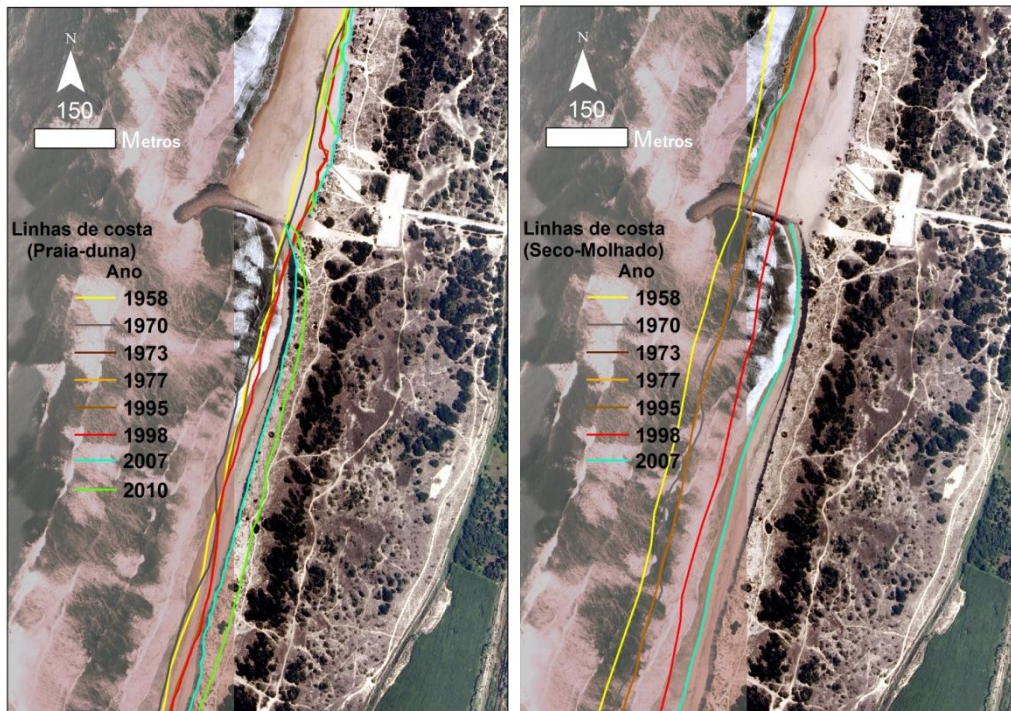


Figura 24: Contato praia-duna (esquerda) e seco-molhado (direita) cartografados para o estudo da evolução da linha de costa entre o ano 1958 e 2010. Ao fundo, a fotografia de 2007 (Fonte: IGP).

3.4.2 Cartografia RTK-DGPS (Real-Time Kinematic Global Positioning System)

Foram realizadas duas saídas de campo para a cartografia da linha de costa com o auxílio de um veículo motorizado 4x4 (6/12/2010 e 4/02/2001). O veículo foi equipado com uma antena onde foi fixado um GPS (Trimble® R6 GPS System), operacionalizado em modo RTK (Figura 26). Isto possibilitou a cartografia da linha de costa com dados de posicionamento em tempo real de alta precisão (na ordem dos centímetros). Foi utilizada a Rede Nacional de Estações permanentes receptor móvel (RENEP, disponível em todo o país pelo IGP) (Figura 25). A comunicação entre a RENEP e o receptor móvel foi realizada por *General Packet Radio Service* (GPRS) com um aparelho de telefone móvel. Esta técnica de posicionamento ocorre com uma estação de referência (fixa) que opera continuamente enviando a posição para um receptor móvel que se desloca pelos diversos pontos da rede (Vasconcelos, 2009).

3.5 Cálculos da evolução da linha de costa

Para o cálculo da evolução da linha de costa foi utilizado o Digital Shoreline Analysis System 4.0. O DSAS é um *software* de livre acesso desenvolvido pelos Serviços Geológicos dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS) em cooperação com Innovate! Inc., funcionando como uma extensão para o ArcMap™. A utilização deste *software* permite a análise das taxas de erosão/deposição através de cálculos sobre uma série de dados de posições de linhas de costa, no qual transectos, ortogonais a uma linha de base são criados ao longo de um trecho costeiro desejado e com um espaçamento determinado pelo usuário (Thieler *et al.*, 2009) (Figura 27).

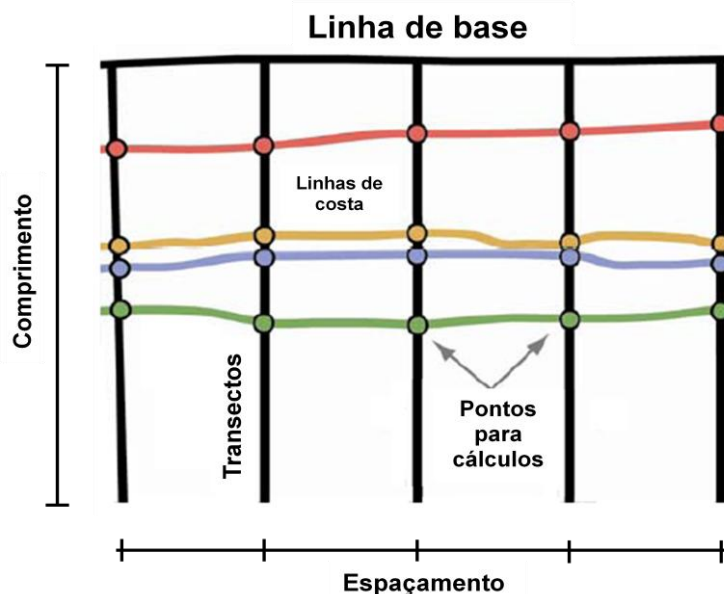


Figura 27: A linha de base e os transectos ortogonais e igualmente espaçados para utilizados pelo DSAS para cálculos da evolução de linha de costa (Figura adaptada de Thieler *et al.*, 2009).

Para a criação da linha de base, teve-se como referência uma linha de vegetação estabilizada, paralela à linha de costa, e presente em quase toda a área de estudo. Quando esta não estava presente, utilizou-se como referência as frentes urbanas ou linhas sempre paralelas ao trecho da linha de costa adjacente. Foram gerados 994 transectos, com espaçamento de 50 m e 700 m de comprimento (Figura 28). Os métodos estatísticos aplicados pelo DSAS calculam as taxas de variação de uma linha de costa baseando-se nos diferentes posicionamentos da mesma ao longo do tempo em um certo transecto (Thieler *et al.*, 2009). O utilizador pode optar por diferentes métodos estatísticos conforme o seu objetivo de estudo.

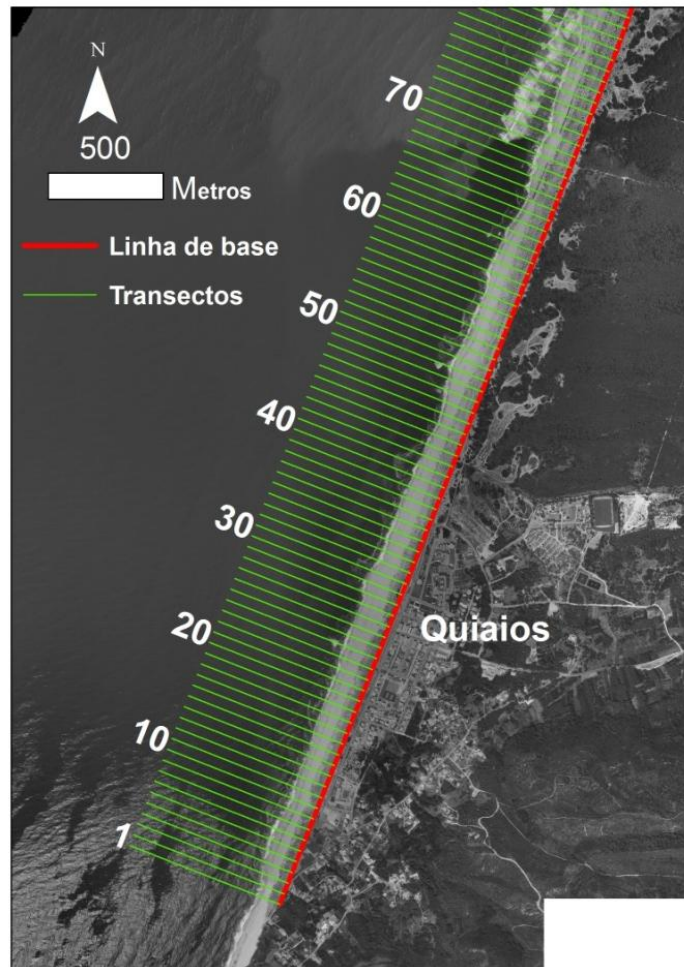


Figura 28: A linha de base e os transectos ortogonais (700 m de comprimento, espaçamento de 50 m) nos primeiros quilómetros da área de estudo. Ao fundo a Fotografia aérea de 2007 (Fonte: IGP).

Foram utilizados para este presente estudo os métodos *Shoreline Change Envelope*, *End Point Rate* e *Linear Regression Rate*. O método *Shoreline Change Envelope* estipula a variação (em metros) entre a linha de costa mais próxima e a mais distante (referente a linha de base) de cada transecto. Este método apresenta valores absolutos, indicando apenas uma distância (sempre positiva) entre duas linhas de costa, não considerando se esta distância ocorreu por motivos erosivos ou acrecionários. O *End Point Rate* calcula uma taxa evolutiva, e apresenta como principal vantagem o facto de utilizar apenas duas posições de linha de costa em cada transecto, exigindo menos esforço computacional. Porém, quando existem mais de duas linhas de costa, tais dados são ignorados já que o cálculo é realizado somente entre a linha de costa mais antiga e a mais recente. O método da *Linear Regression Rate*, por sua vez, apresenta a vantagem de utilizar todas as linhas de costa disponíveis em cada transecto, calculando a taxa de evolução da linha de costa por uma regressão linear simples (Thieler *et al.*, 2009) (Figura 29).

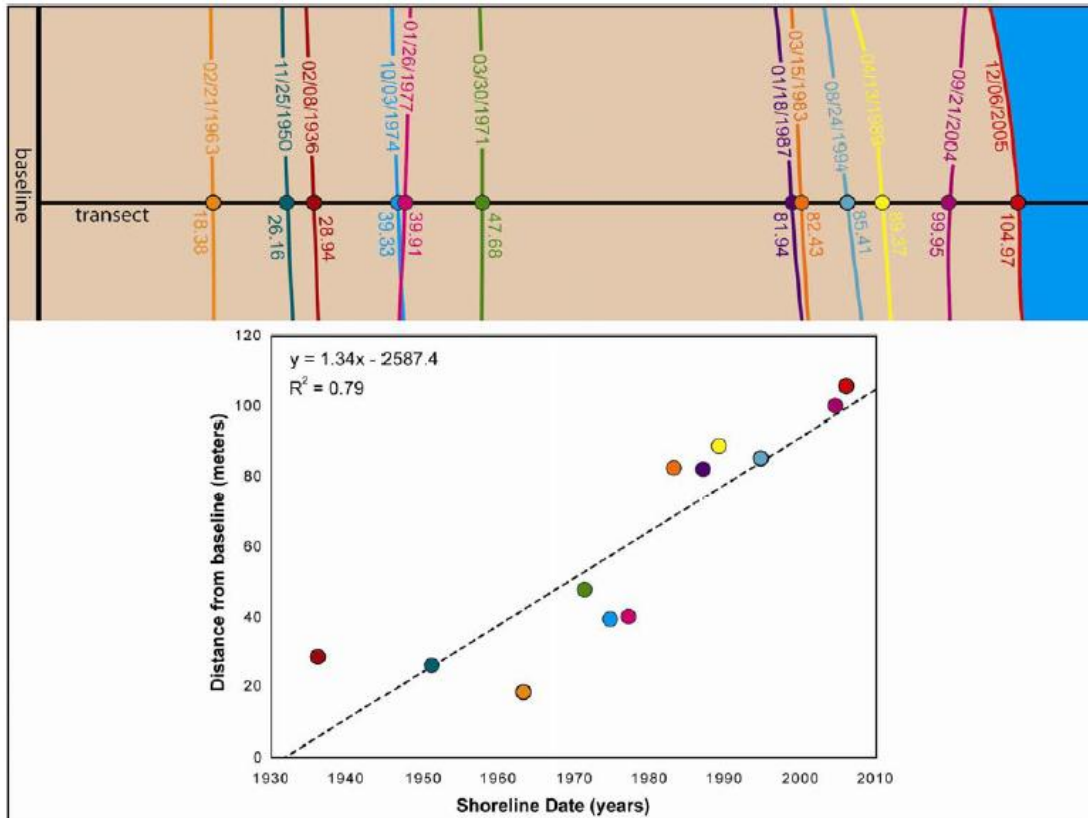


Figura 29: Demonstração do ajuste da reta do método de regressão linear simples a um conjunto de posições históricas de linha de costa. O declive da equação indica a taxa de variação da linha de costa (1.34 m/ano) (Thieler *et al.*, 2009).

Capítulo IV – Resultados

4.1 Evolução da Linha de Costa entre 1958 e 1970/73

4.1.1 Limite Seco-Molhado entre 1958 e 1970/73

A cobertura de fotografia aérea de 1970 abrange apenas a área entre o sul da Praia de Mira e os molhes de Aveiro, enquanto a cobertura tomada no ano de 1973 abrange a área entre o cabo Mondego e o sul de Praia de Mira. Por isso, as duas coberturas foram utilizadas em conjunto para que fosse possível o estudo de todo o trecho litoral em questão (Figura 17; Figura 30; Figura 31).

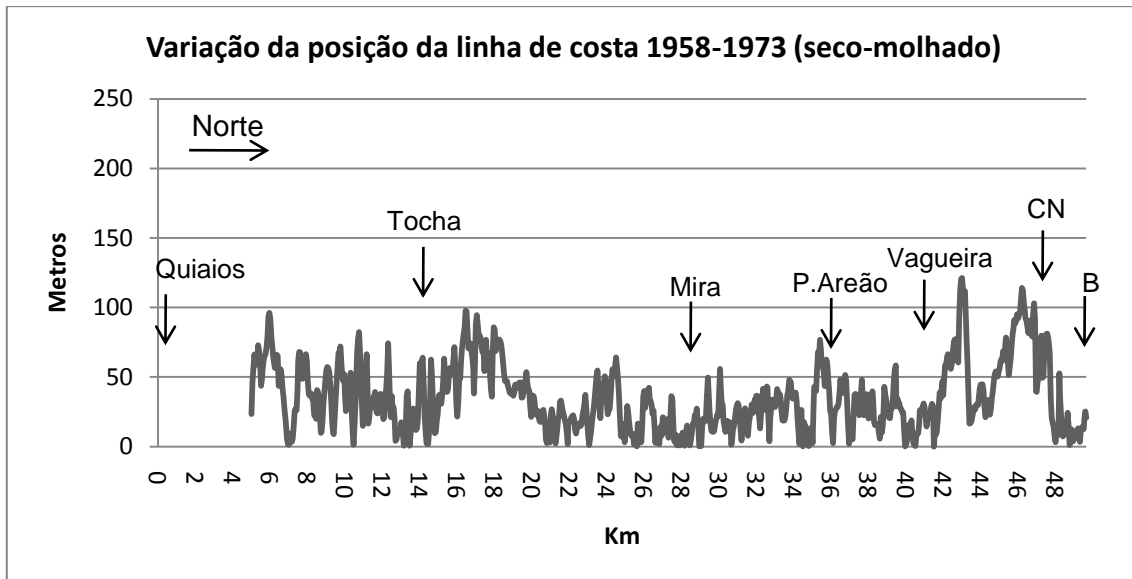


Figura 30: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador seco-molhado. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro).

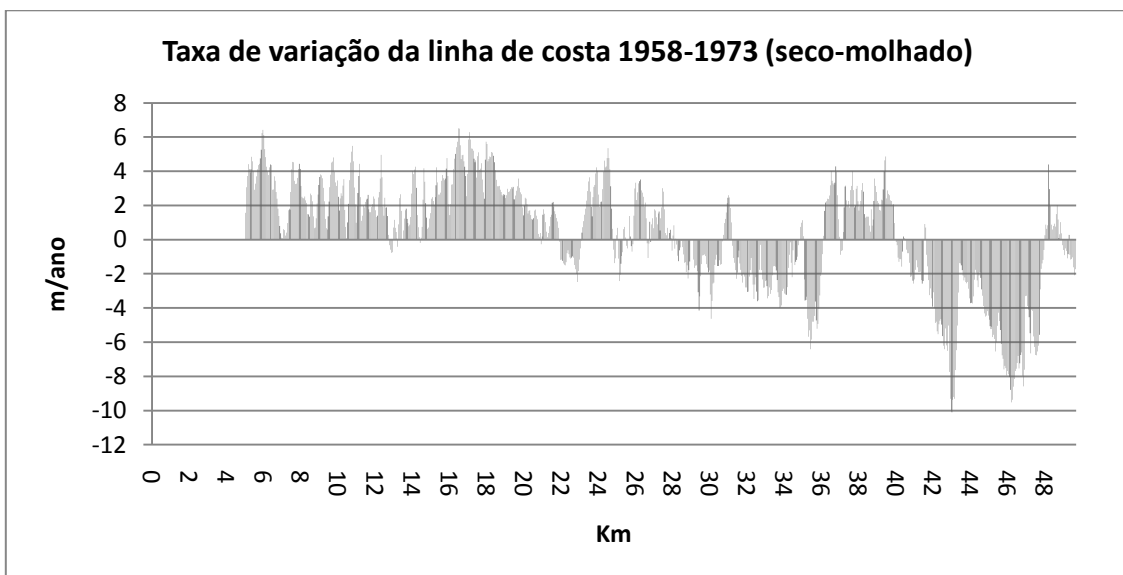


Figura 31: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador seco-molhado.

Pela análise das fotografias aéreas de 1970 e 1973 destaca-se a clara visualização de duas feições morfológicas em toda a área de estudo. As barras arenosas (muitas delas oblíquas), com comprimentos frequentemente superiores a 100 m, se destacam para a área mais setentrional (entre os molhes de Aveiro e a povoação de Vagueira) e para a área meridional (desde norte de Palheiros de Tocha até as proximidades do cabo Mondego). As outras feições de destaque são as cúspides bem formadas e ritmadas ao longo da área mais central (entre Vagueira e norte de Palheiros de Tocha), com comprimentos cerca dos

200 metros. Quando os dados são referidos ao limite seco-molhado, torna-se importante apresentar previamente estas feições, as quais interferem diretamente na posição da linha de costa, com influência no estudo da sua evolução.

Durante este período, após a finalização da construção dos molhes (ano de 1958), o segmento costeiro entre as povoações de Barra de Aveiro e de Vagueira foi o mais afetado, com variações da linha de costa que ultrapassam os 120 metros (-8m/ano) (Figura 30; Figura 31). A evolução da linha de costa apresentou áreas erosivas que atingiram a sul as proximidades de Mira, porém com valores menores, entre os -2 e -4 m/ano. Para o segmento sul da área de estudo (a sul do Km 22) verificou-se a progradação da linha de costa, com valores de +1 aos +6 m/ano e avanço de mais de 80 m ao norte da povoação de Palheiros de Tocha (Figura 30; Figura 31). Percebem-se variações de avanço da linha de costa, diferentes da tendência geral, as quais parecem coincidir com a presença das barras arenosas e das cúspides presentes durante a tomada das fotografias aéreas na área de estudo (p.ex. entre os Kms 36 e 40) (Figura 30; Figura 31).

4.1.2 Limite Praia-Duna entre 1958 e 1970/73

O limite praia-duna não foi cartografado em toda a área de estudo pelo fato da sua má visualização na cobertura do ano de 1958 e pela sua ausência nas coberturas mais recentes, especialmente devido a destruição do cordão dunar na área mais setentrional (Figura 12). Por isso a evolução da linha de costa neste segmento ao norte, segundo o limite praia-duna, não foi estudada para nenhum período. A evolução do limite praia-duna (Figura 32; Figura 33) indica uma evolução semelhante ao registado para o limite seco-molhado apresentado previamente. O setor ao norte de Praia de Mira apresenta segmentos com regressão do limite praia-duna, enquanto que a sul desta povoação há generalizado avanço da linha de costa (atingindo 50 m), especialmente entre as povoações de Praia de Mira (Km 29) e Palheiros de Tocha (Km 14), com taxas que alcançam +3 m/ano

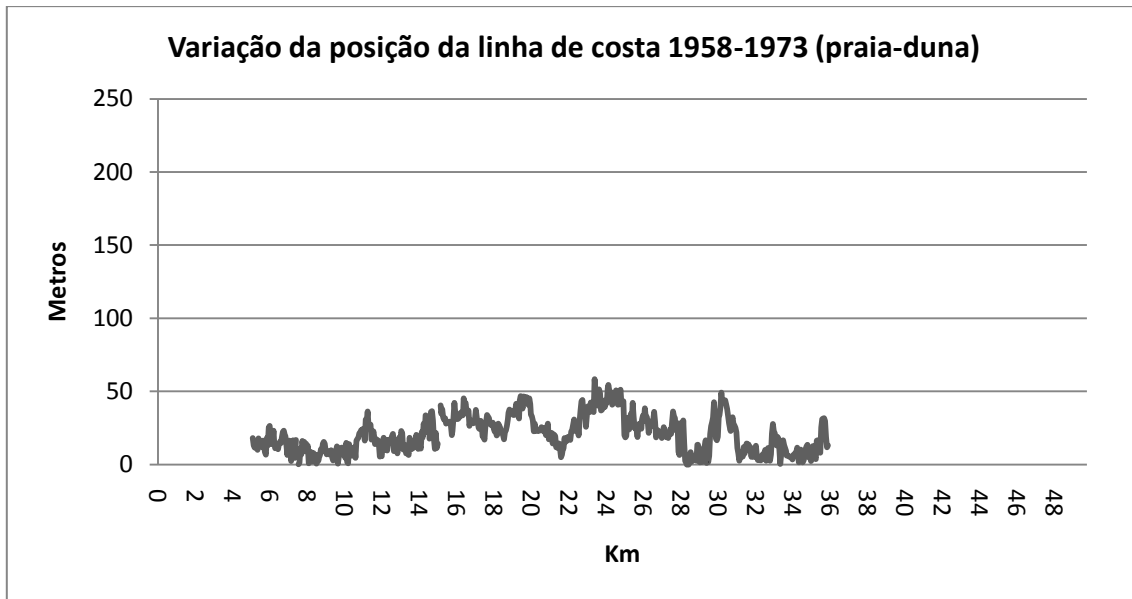


Figura 32: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador praia-duna.

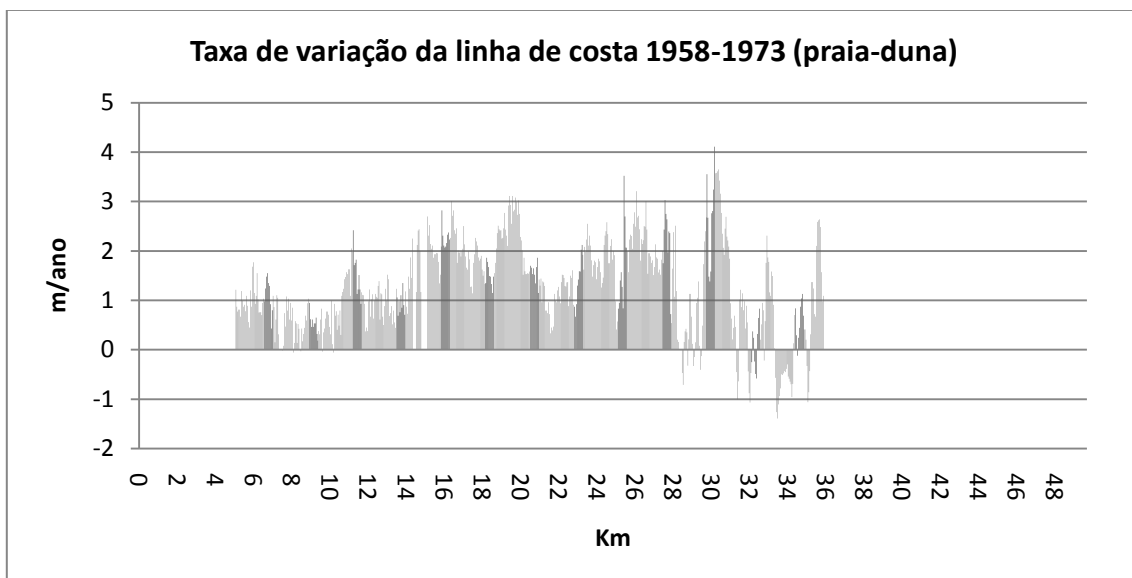


Figura 33: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 1973 segundo o indicador praia-duna.

4.2 Evolução da Linha de Costa entre 1970/73 e 1995

4.2.1 Limite Seco-Molhado entre 1970/73 e 1995

A evolução do limite seco-molhado entre 1970/73 e 1995 demonstra um setor dominado pela erosão (Figura 34; Figura 35), nomeadamente entre o Km 47 (Costa Nova do Prado) e o Km 29 (norte da Praia de Mira), setor este controlado por nove esporões (Figura 8). Durante o período analisado a linha de costa regrediu no seu máximo 235 m ao sul de Costa Nova do Prado, a que corresponde uma taxa de evolução de -9 m/ano (Figura 35).

Ocorreu uma pequena progradação ao norte de Praia de Mira (Km 29), mas voltou a regressir a uma taxa de -1 a -2 m/ano imediatamente sul (entre Km 25 e 29) dos dois esporões que foram fixados na década de 80 ao sul desta povoação. Mais a sul, entre os esporões de Praia de Mira e o Km 10, este limite apresentou uma generalizada tendência para acreção, com valores entre os +1 e +4 m/ano (valor médio que se poderá estimar em cerca de +2 m/ano), e uma progradação em alguns locais superior a +50 m. Nos nove quilómetros de costa imediatamente a norte do cabo Mondego, houve um recuo médio da linha seco-molhado de cerca de -1 m/ano mas localmente atingiram-se taxas de -4 m/ano e variações superiores aos 50 m.

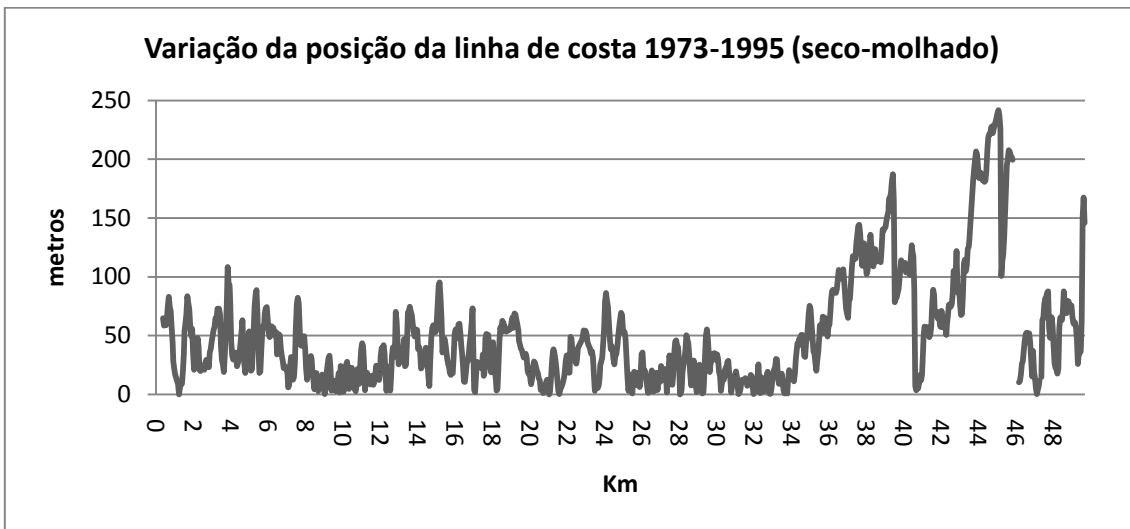


Figura 34: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1973 e 1995 segundo o indicador seco-molhado.

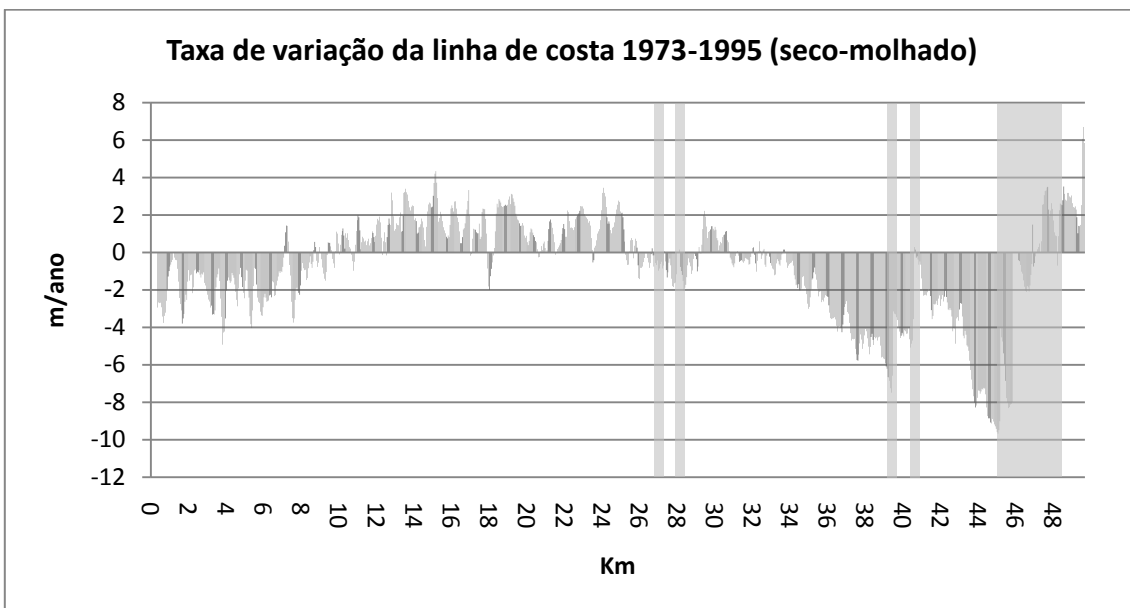


Figura 35: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1973 e 1995 segundo o indicador seco-molhado. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.2.2 Limite praia-duna entre 1970/73 e 1995

No segmento mais ao norte, até ao km 24, o limite praia-duna recuou a uma taxa média estimada de -1 m/ano, mas quase atingindo -3 m/ano na Praia do Areão (Km 36; limite norte cartografado) (Figura 36; Figura 37). Esta forte regressão diminuiu para sul, mas manteve taxas entre -1 e -2 m/ano, inclusive no segmento controlado pelos dois esporões (Km 27 e 28) de Praia de Mira. No sector situado entre os Km 24 e Km 9, o limite praia-duna avançou em direção ao mar com um valor estimado médio de +1 m/ano, mas localmente quase atingindo +2 m/ano.

A evolução do limite praia-duna é similar à da evolução do limite seco-molhado no mesmo período, sendo também notada regressão da linha de costa nos primeiros nove quilómetros a norte do cabo Mondego (Figura 35; Figura 36; Figura 37). Neste último segmento, a resposta do limite praia-duna foi mais lenta, com valores inferiores a -0,5 m/ano.

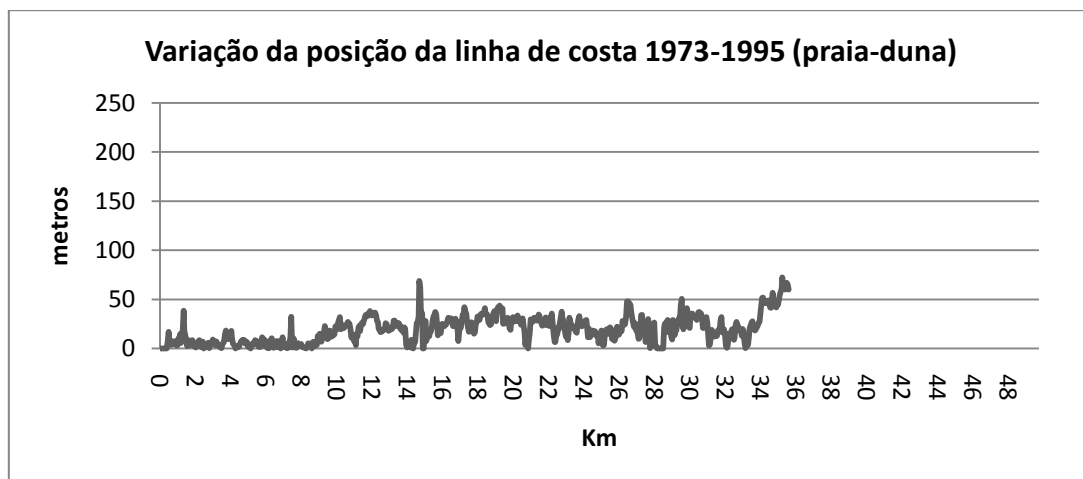


Figura 36: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1973 e 1995 segundo o indicador praia-duna.

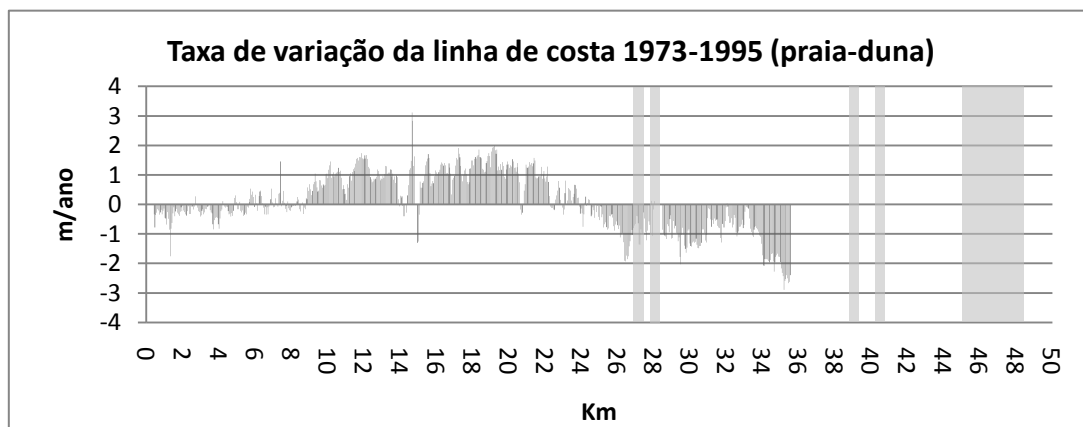


Figura 37: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1973 e 1995 segundo o indicador praia-duna. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.3 Evolução da Linha de Costa entre 1995 e 1998

4.3.1 Limite Seco-Molhado entre 1995 e 1998

Para os 4 anos entre as coberturas de fotografia aérea de 1995 e 1998 verificou-se uma elevada regressão da linha de costa para quase toda a área de estudo, com exceção dos primeiros 6 Km ao norte do Cabo Mondego, troço que apresentou uma tendência de equilíbrio dinâmico ou mesmo acreção (Figura 38; Figura 39).

Desde o molhe sul do porto de Aveiro até ao sul de Praia de Mira (entre o Km 46 e o Km 22) existem setores entre os esporões construídos ao longo da costa. Estes setores apresentam evoluções muito semelhantes, com uma redução do recuo da linha de costa a barlamar (no caso em estudo, a sul) e um aumento do recuo a sotamar. O setor com maior recuo foi o entre as povoações de Costa Nova do Prado (Km 47) e de Vagueira (Km 43), com taxas que em dois locais ultrapassaram os -30 m/ano. Na área adjacente ao molhe sul de Aveiro (entre o Kms 46 e 49), também foi observado o recuo da linha de costa, apresentando taxas superiores ao -20 m/ano.

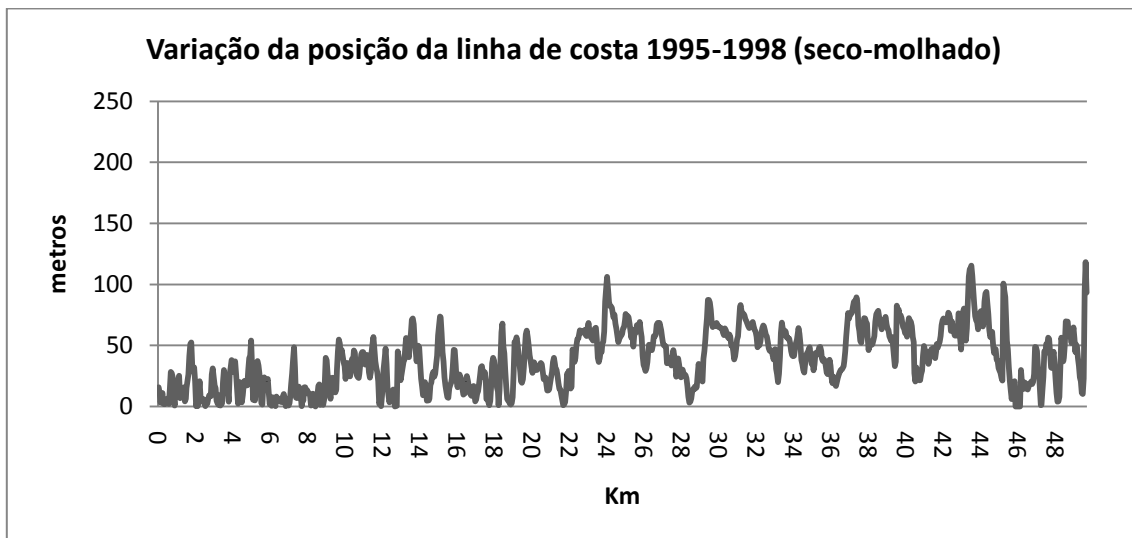


Figura 38: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador seco-molhado.

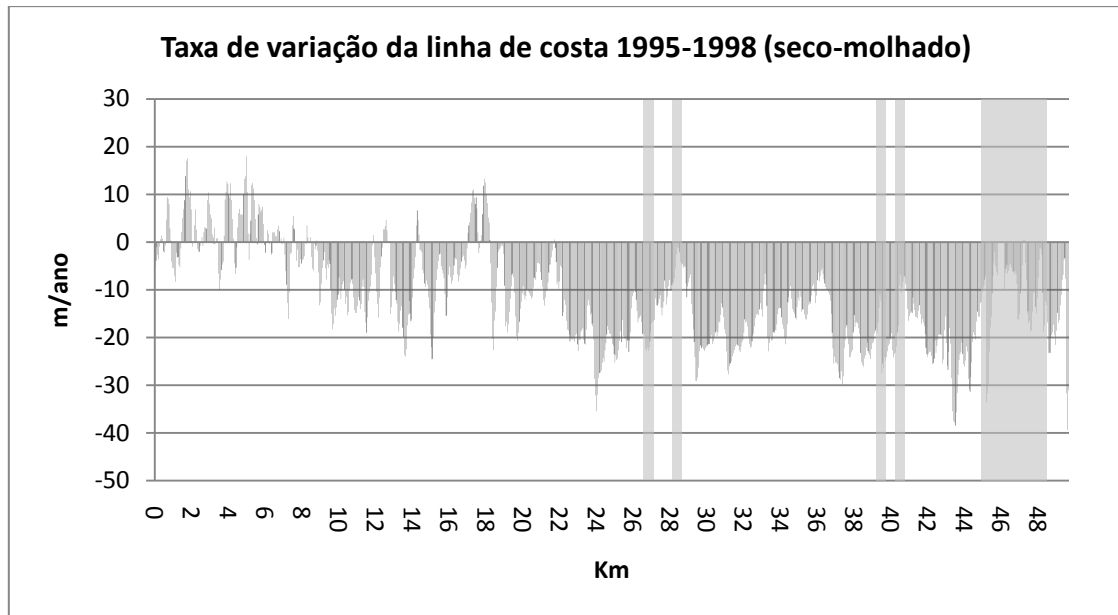


Figura 39: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador seco-molhado. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.3.2 Limite praia-duna entre 1995 e 1998

Do Km 36 ao Km 21 não se nota tendência de variação no limite praia-duna, pois este limite embora interior já é erosivo e a costa adjacente está estabilizada por obras de defesa costeira. Contudo, imediatamente a sotamar dos dois esporões localizados na povoação de Praia do Areão, o recuo alcançou taxas de -5 m/ano (Km 32 e 36) (Figura 39; Figura 40; Figura 41).

Do Km 21 ao Km 8 (imediações da Povoação de Palheiros de Tocha), registou-se recuo; as taxas evolutivas são menos expressivas que as do indicador seco-molhado, embora cheguem a atingir médias máximas de -10 m/ano (ex. Kms 12-10). Nos Kms 8-4 verificou-se alguma acreção e nos Kms 4-0 equilíbrio, muito similarmente ao descrito para o limite seco-molhado.

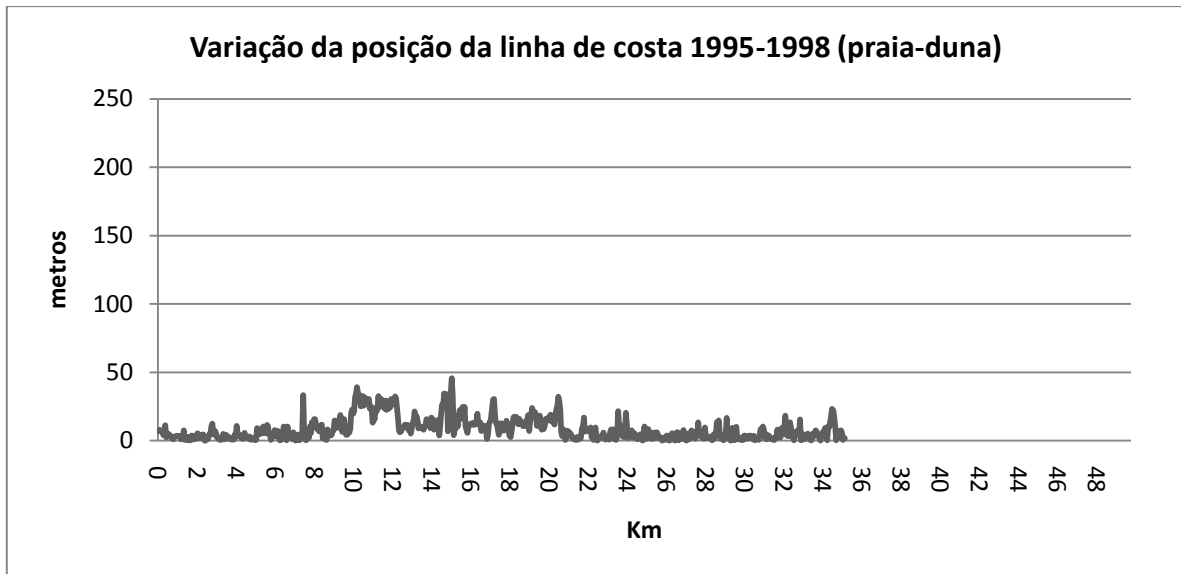


Figura 40: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador praia-duna.

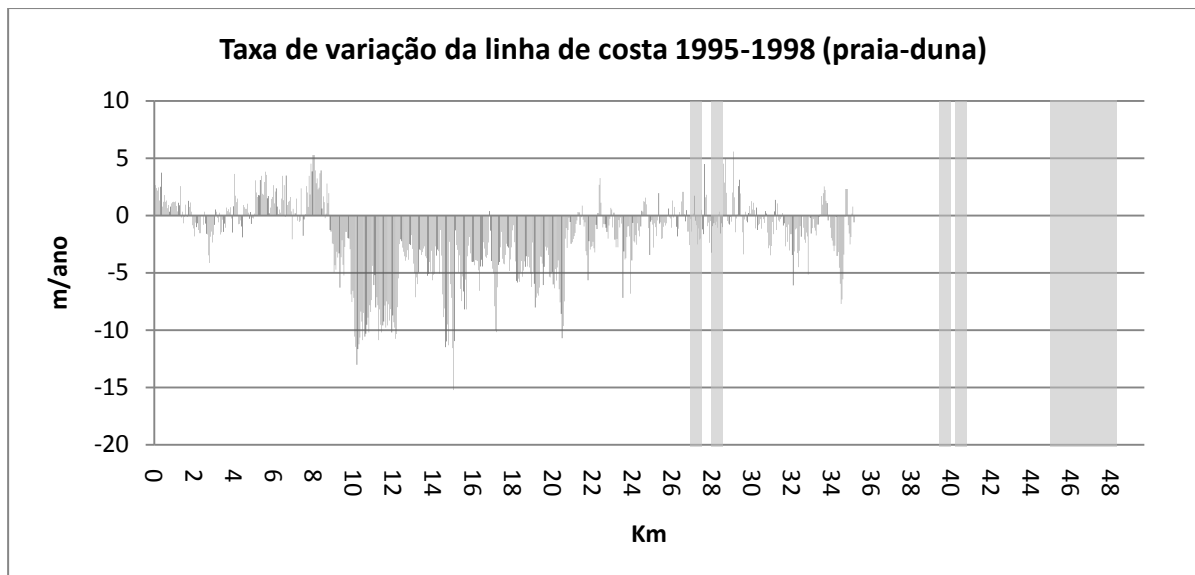


Figura 41: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998 segundo o indicador praia-duna. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.4 Evolução da Linha de Costa entre 1998 e 2007

4.4.1 Limite Seco-Molhado entre 1998 e 2007

A evolução entre os anos 1998 e 2007 demonstrou setores bem definidos (Figura 42; Figura 43). Da Praia da Vagueira (Km 41) até a povoação de Praia de Mira (Km 29) a evolução da costa foi estabilizada pelos esporões, embora com acreção a barlamar dos esporões (atingiu +7 m/ano, no Km 33) e erosão a sotamar destes (atingiu -8 m/ano, no Km 33).

Ocorreu progradação registada foi de aproximadamente +7 m/ano (Km 33). Já a maior regressão registada foi cerca de -8 m/ano (Km 33) (Figura 43).

Outra resposta que se destaca é a progradação da linha de costa na povoação de Barra de Aveiro, situada ao sul do molhe de Aveiro, controlada por um campo de cinco esporões. Nesta área a evolução apresentou taxas com valores frequentemente superiores a +8 m/ano. Um outro setor com alguma progradação foi aquele entre os Kms 16 e 6 (ao sul da Praia de Palheiros de Tocha), com taxas médias de cerca de +2 m/ano (e máximo local de +8 m/ano). Nos primeiros seis quilómetros a norte do cabo Mondego verificou-se tendência para um equilíbrio.

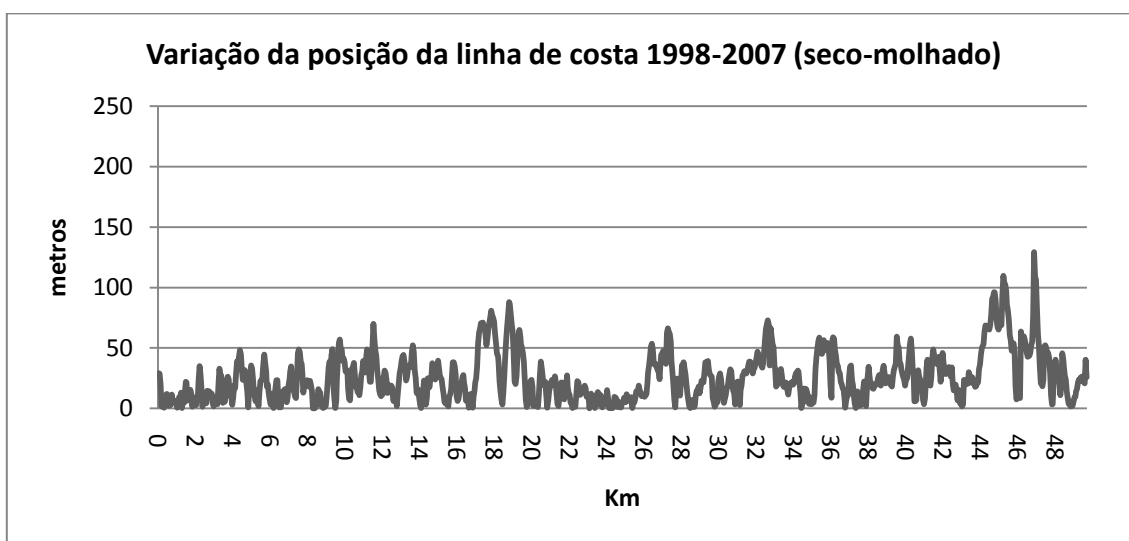


Figura 42: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador seco-molhado.

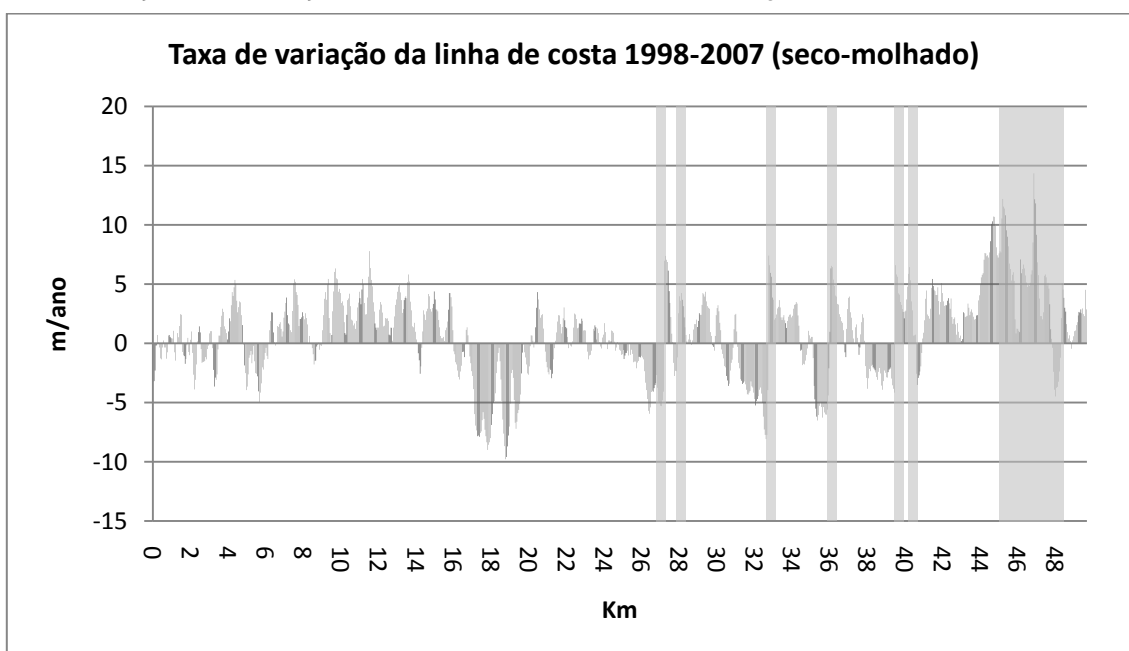


Figura 43: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador seco-molhado. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.4.2 Limite praia-duna entre 1998 e 2007

Entre os anos 1998 e 2007, o limite praia-duna indica quatro setores quanto a evolução da linha de costa (Figura 44; Figura 45). O primeiro setor apresenta uma forte erosão marinha (entre os Kms 30 e 35), localizado ao norte da povoação e Praia de Mira (Km 29), com taxas que atingem os -6 m/ano apesar de se situar num troço controlado por esporões (que se estendem para sul até ao Km 27).

O segundo setor (entre os Kms 25 e 2), apresentou progradação com taxas máximas entre os +4 e +6 m/ano próximo a povoação de Palheiros de Tocha (Km 14), onde a linha de costa demonstrou um avanço superior aos 50 metros. Para sul, próximo a Quiaios (Km 1) este limite apresenta-se já sem variações.

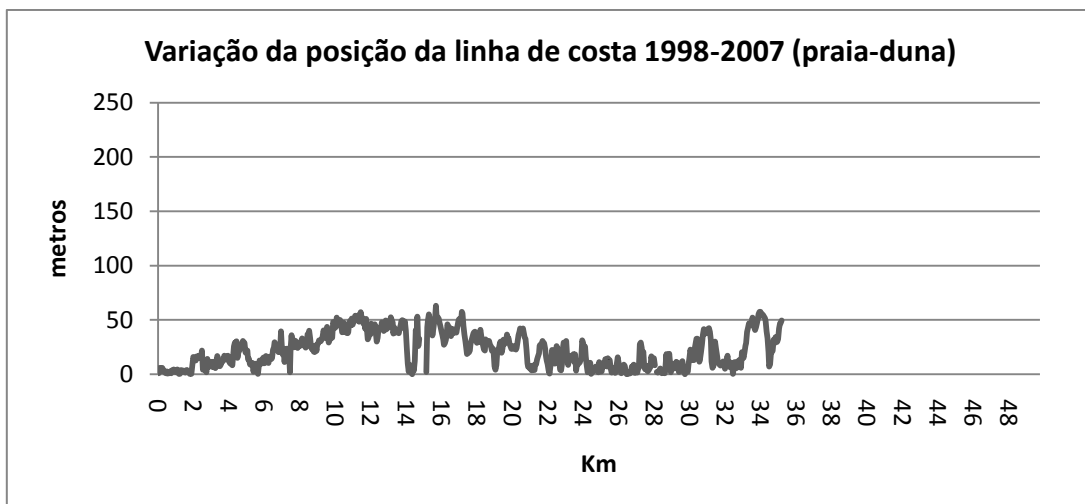


Figura 44: Variação (m) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador praia-duna.

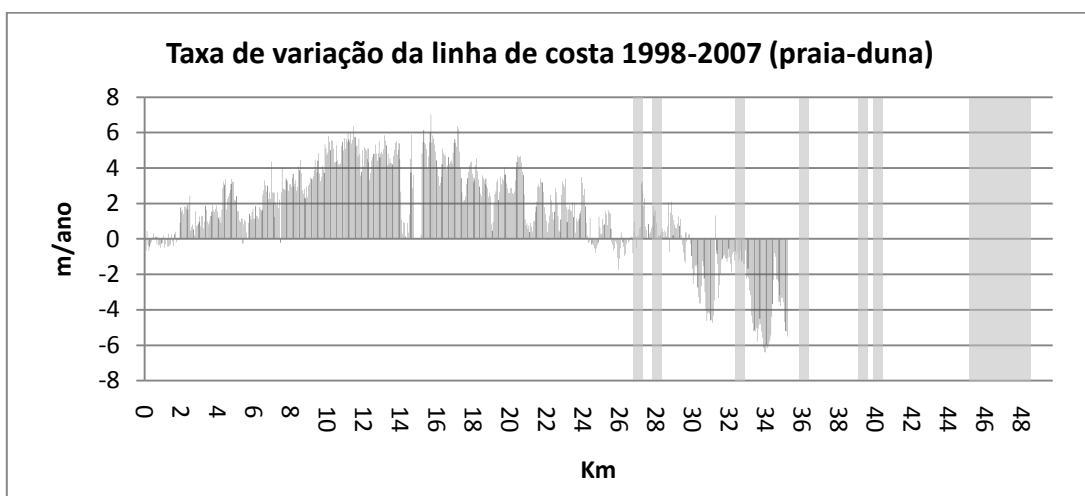


Figura 45: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007 segundo o indicador praia-duna. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.5 Taxas de Evolução da Linha de Costa – Variabilidade de Médio Termo (1958 a 2007)

Os resultados aqui apresentados são derivados da aplicação do método de regressão linear aos dados das posições das linhas de costa entre os anos 1958, 1970/1973, 1977, 1995, 1998 e 2007. A regressão linear foi aplicada para os dois indicadores de linhas de costa em estudo, cujos dados são expostos a seguir. Para os cálculos referentes ao limite praia-duna, foi incluída a linha de costa referente ao ano de 2010, cartografada com RTK-DGPS.

4.5.1 Variabilidade de Médio Termo (1958 a 2007) - Limite seco-molhado

A evolução da linha de costa ao longo dos quarenta e nove anos de análise demonstra setores muito diferenciados desde o cabo Mondego até o molhe sul do porto de Aveiro, com características erosivas a progradantes (Figura 46). Justo a sul do molhe sul de Aveiro (Km 49) a linha de costa apresentou uma acreção com um valor máximo de +2 m/ano. Um setor em forte erosão se inicia ao sul do campo de esporões de Costa Nova do Prado (Km 47). De fato, é entre estes esporões e a Vagueira onde ocorrem as maiores taxas de erosão, com um valor máximo de -6.7 m/ano. Na Vagueira (Km 41), a taxa de recuo do limite seco-molhado é consideravelmente menor a norte (a barlar da deriva litoral dominante) dos dois esporões ali localizados.

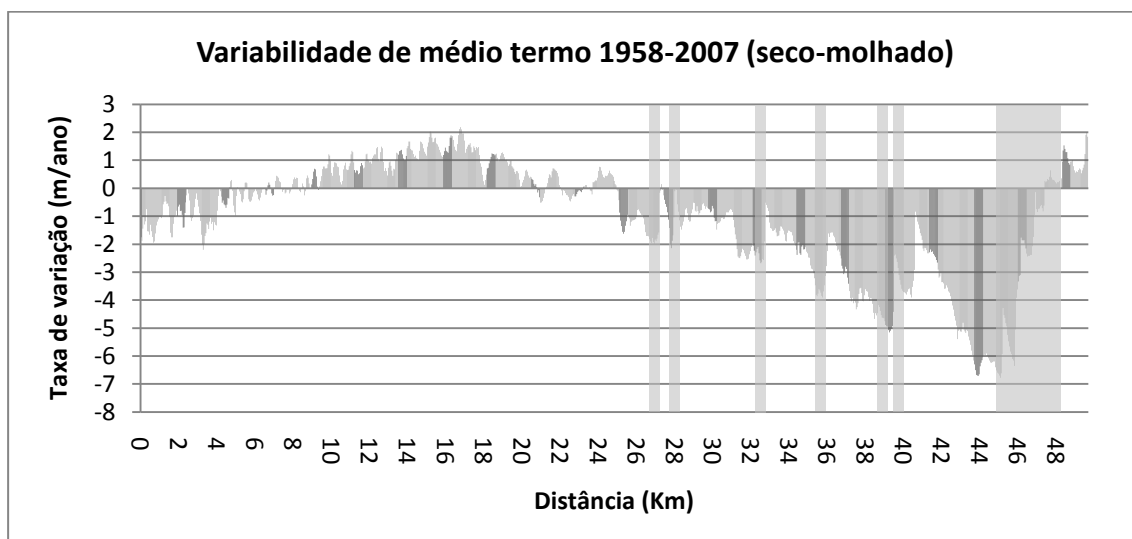


Figura 46: Variabilidade de médio termo (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 2007 segundo o indicador seco-molhado. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa referentes a 1970/73, 1977, 1995, 1998, 2007. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

Da Vagueira ao Km 25 ocorreu recuo erosivo, progressivamente menor para sul (a sotamar da deriva dominante). Contudo, a construção de esporões fez com que a linha de costa passa-se de linear a uma geometria em serra. A barlamar de cada esporão as taxas são menos negativas enquanto a sotamar chegam a atingir -4 a -5 m/ano.

Do Km 25 ao Km 8 existiu algum recuo do mar com máximo de +2 m ao km 16 (arredores de Palheiros de Tocha). Para sul, nota-se um último segmento em transgressão, correspondendo a sete quilómetros de faixa costeira, atingindo taxas entre -1 e -2 m/ano, com destaque para o valor de -1,9 m/ano nas proximidades de Quiaios. O último seguimento relatado foi analisado está compreendido entre os anos 1973 e 2007, já que a cobertura fotográfica do ano de 1958 não inclui esta área entre o cabo Mondego e o norte de Quiaios, e as comparações com as taxas para os outros segmentos devem ser feitas com cuidado.

4.5.2 Variabilidade de Médio Termo (1958 a 2007) - Limite praia-duna

Não houve possibilidade de se representar a evolução do limite entre a praia e a duna, a norte do km 38. Os dados sobre a evolução deste limite entre a praia e a duna, para os últimos 1.3 km ao norte limitaram-se aos anos 1970, 1995, 1998 e 2007 (Figura 17). Isto assim sucedeu-se pelo fato da falta de uma linha de costa que representasse o ano de 1958 neste segmento, já que as fotografias aéreas que cobrem esta área apresentam-se com má qualidade. Para os primeiros 5 quilómetros ao norte do cabo Mondego, a evolução foi calculada entre os anos 1973, 1977, 1995, 1998, 2007 e 2010; as linhas de costa referentes aos anos 1977 e 2010 não cobrem a totalidade da área de estudo (Figura 17), porém, quando presentes, foram incluídas nos cálculos das taxas de regressão linear.

Na evolução da linha de costa segundo o limite praia-duna, o setor de norte até ao Km 26 sofreu uma generalizada regressão mesmo tratando-se de um troço com esporões. Imediatamente a sul dos esporões de Vagueira (Km 40), registou-se taxa máxima de -5 m/ano (e seria provavelmente ainda maior para o sector a norte, até à Barra de Aveiro). Taxas entre os -5 e os -3 m/ano verificaram-se imediatamente a norte de cada um dos dois esporões localizados entre a Vagueira e a Praia de Mira. Entre o Km 26 (a sul dos esporões da Praia de Mira o limite praia-duna apresenta uma ligeira progradação com máximo de cerca de +1,5 m/ano ao Km 17 (proximidades de Palheiros de Tocha), sendo frequentes valores superiores a +1 m/ano. Os últimos quatro quilómetros até o cabo Mondego apresentaram estabilidade e testemunham que só imediatamente a barlamar deste importante ponto fixo da costa (o cabo Mondego) o limite praia-duna não sofreu variação entre situações distanciadas de cerca de 50 anos.

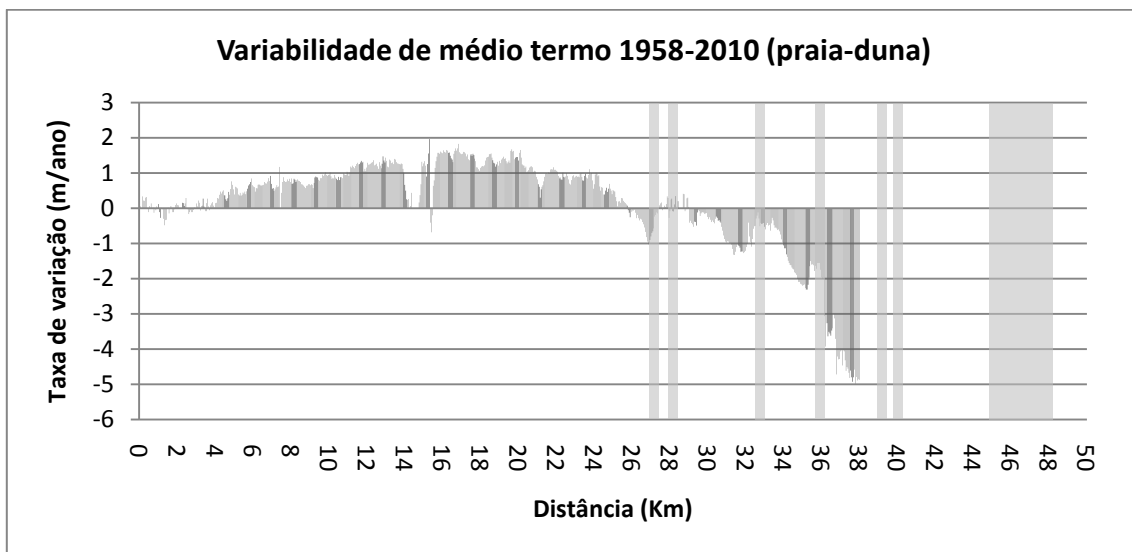


Figura 47: Variabilidade de médio termo (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 2007 segundo o indicador praia-duna. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa disponíveis. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.6 Taxas de Evolução da Linha de Costa – Variabilidade Recente (1995 a 2007)

A apresentação das taxas de evolução recente da linha de costa é considerada importante pelo fato de indicarem a variabilidade associada às intervenções humanas decorridas nos últimos anos. Além disto, os resultados das taxas evolutivas recentes podem ser comparados em magnitude com aqueles da variabilidade de médio termo, especialmente entre as células do litoral apresentadas no decorrer deste capítulo, onde o caráter regressivo ou progradante está bem marcado.

4.6.1 Variabilidade Recente (1995 a 2007) - Limite seco-molhado

O período analisado compreende doze anos, dos quais fazem parte as linhas de costa de 1995, 1998 e 2007. Apesar de somente três linhas de costa terem sido utilizadas para o cálculo das taxas de evolução, alguns setores podem ser destacados, especialmente aqueles onde houve uma tendência clara regressiva ou progradante (Figura 48). Imediatamente ao sul do molhe sul de Aveiro (km 49) um segmento de ~2 Km sofreu recuo do limite seco-molhado, com taxas cerca dos -3 m/ano. Este setor erosivo se prolonga até Costa Nova do Prado (Km 47), onde ocorreu uma acreção numa extensão de três quilómetros, controlado por um campo de cinco esporões e um enrocamento longilitoral de 750 metros (Km 46); esta acreção atingiu taxas superiores a +4 m/ano.

Ao sul deste pequeno segmento em acreção, identificou-se um troço erosivo de aproximadamente 28 quilómetros (entre os Kms 45 e 16), com taxas evolutivas que chegam a ultrapassar frequentemente os -5 m/ano e máximo local de -10 m/ano. Este sector está condicionado por esporões até ao Km 27 /Praia de Mira), que nalguns casos originaram algumas centenas de metros com acreção a barlamar de cada esporão, com taxas de +2 a +3 m/ano. Entre o Km 16 (junto a Palheiros de Tocha) e o cabo Mondego, o limite seco-molhado apresenta taxas variáveis entre -3 e + 5 m/ano, mas de tendência fracamente positiva.

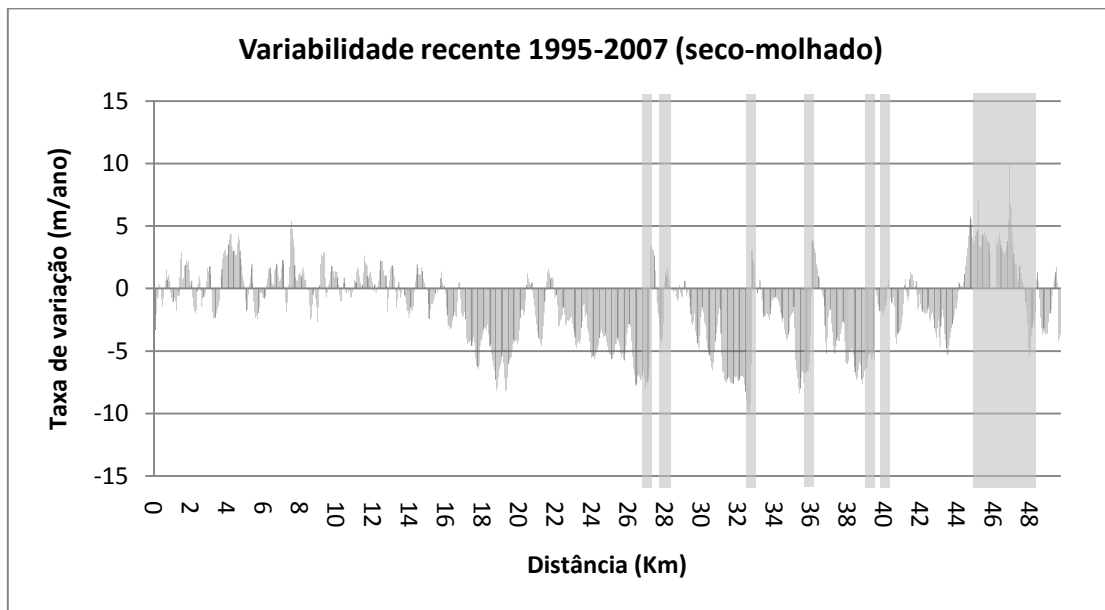


Figura 48: Variabilidade recente (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 2007 segundo o indicador seco-molhado. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa referentes a 1995, 1998, 2007. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

4.6.2 Variabilidade Recente (1995 a 2007) - Limite praia-duna

Fazem parte destes resultados os retirados das coberturas dos anos de 1995, 1998, 2007 e 2010. Em relação a linha de costa do ano de 2010, vale lembrar que esta foi cartografada com RTK-DGPS, com uma extensão de aproximadamente 35 quilómetros, desde Quiaios até norte de Praia de Mira (~Km 36).

De norte este limite evidencia uma variação em recuo, mais acentuada a norte (atingindo -10 m/ano ao Km 38) e decrescendo para sul (os valores máximos das taxas de regressão se situaram frequentemente entre os -4 e -6 m/ano) até ao Km 24, já imediatamente a sul dos dois esporões da Praia de Mira.

O limite praia-duna não demonstrou progradação a barlamar dos esporões, excepto na Praia de Mira em que apresentou uma taxa máxima de +2 m/ano entre os dois esporões ali presentes. A sotamar destes esporões o limite recuou com uma taxa máxima de -2 m/ano. Nos 24 quilómetros seguintes até o cabo Mondego verificou-se progradação deste limite, alcançando uma taxa máxima de +4 m/ano ao Km 16 (proximidades de Palheiros de Tocha) e depois reduzindo-se até ao cabo Mondego (em Quiaios é já $< +1$ m/ano).

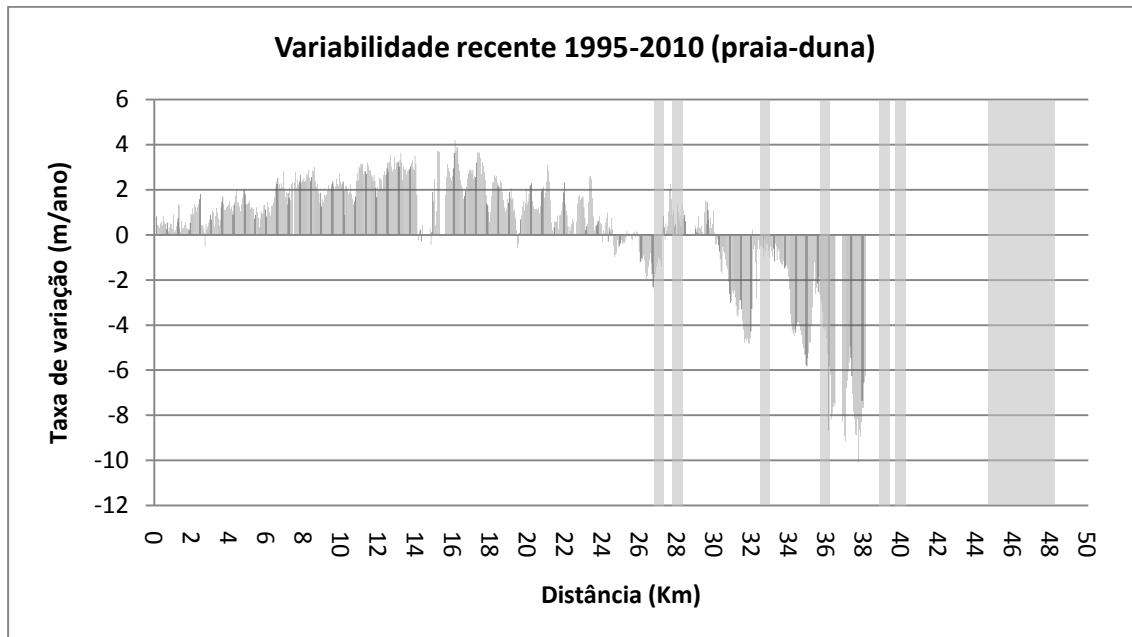


Figura 49: Variabilidade recente (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 2010 segundo o indicador praia-duna. Estas taxas foram calculadas por um método de regressão linear aplicado às linhas de costa referentes a 1995, 1998, 2007 e 2010. As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

Capítulo V - Discussão

5.1 Comparação entre os indicadores de linha de costa utilizados

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo final de contribuir para a compreensão do comportamento evolutivo da linha de costa entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro. Paralelamente a isto, tornou-se importante a discussão sobre a utilização de um indicador de linha de costa que pudesse melhor representar tal evolução. Como foi apresentado no capítulo de Resultados, existem diferenças entre as variações da linha de costa quando os dados obtidos pelo indicador praia-duna e o indicador seco-molhado são comparados. Assim, como já foi comentado com base na literatura anteriormente referida,

estes indicadores apresentam diferentes respostas aos processos que ocorrem na dinâmica faixa litoral. Entender a mobilidade destes, e de outros indicadores de linha de costa, é fundamental para uma discussão concisa, assegurando-se das limitações das suas aplicações, e ainda, sobre as suas vantagens e desvantagens. A seguir, será apresentada esta discussão, considerando a comparação entre os indicadores seco-molhado e praia-duna utilizados neste estudo.

5.1.1 Processos relacionados e escalas temporais de estudo

A variabilidade de um indicador de linha de costa está diretamente relacionada com a sua resposta aos processos que ali ocorrem. A área entre o cabo Mondego e os molhes portuários de Aveiro está altamente exposta à ondulação que, especialmente, durante o inverno atinge as praias. A agitação marítima ao largo de Figueira da Foz é uma das mais severas da costa oeste Portuguesa, onde as alturas significativas das ondas podem ser superiores aos 8 m, frequentemente oriundas do quadrante W-N (Costa, 1994; Lorenzo, 2011). A influência do ataque destas ondas mais energéticas é fundamental na mobilidade do indicador praia-duna. O indicador praia-duna foi mapeado de acordo com a frente da vegetação dunar em direção à praia alta. O avanço deste limite acontece quando a praia abastece o transporte eólico para o interior e após ocorre a fixação por vegetação. Ou seja, uma praia larga com a presença de uma berma bem formada favorece a presença e o crescimento da vegetação dunar, e até mesmo a formação de dunas embrionárias como foi visto durante as sucessivas visitas a região entre Quiaios e Praia de Mira. O contrário acontece quando a praia entra em erosão continuada ou em momentos mais curtos com erosão da praia e dunas eólicas por ondulação de temporal. As visitas de campo também permitiram estimar que o erro na cartografia do limite praia-duna não ultrapassa a ordem dos 10 m, o que resulta num erro de 1 m/ano em períodos de análise de dez anos.

Segundo Hanslow (2007), a utilização da linha de vegetação como indicador deve considerar as intervenções antrópicas eventualmente realizadas (seja para sua destruição ou estabilização), bem como a ocorrência de incêndios, secas e processos eólicos. Na área de estudo, a intervenção do homem está relacionada principalmente com a instalação de povoações nas zonas interdunares que incrementaram os acessos de veículos à praia e pisoteio, o que causou destruição do cordão dunar frontal adjacente.

A evolução da linha de costa foi apresentada entre os períodos das coberturas de fotografias aéreas disponíveis (1958-1970/73, 1970/73-1995, 1995-1998, 1998-2007). O comportamento do indicador praia-duna entre os períodos estudados é interessante de ser discutido pois sempre demonstra alguma mobilidade, mesmo num período de somente

quatro anos (1995-1998) (Figura 38 - Figura 41). Em uma escala de tempo maior, como ocorre entre os anos 1973-1995 (12 anos) (Figura 34 - Figura 37) e 1998-2007 (9 anos) (Figura 42 - Figura 45), este indicador apresenta um carácter evolutivo compartimentado em setores distintos. Para setores onde existe uma clara evolução da linha de costa, ou seja, um forte recuo ou avanço, as taxas evolutivas se tornam mais confiáveis já que a dimensão dos erros pode ser desprezada (Moore, 2000). Os erros presentes neste estudo estão associados às fotografias aéreas (qualidade da imagem, rasterização e georeferenciação) e ao processo de mapeamento das linhas de costa pelo utilizador. Na área de estudo notam-se pelo menos dois setores bem definidos: o segmento compreendido entre Praia de Mira e Aveiro e o entre Praia de Mira e norte de Quiaios. O primeiro segmento é caracterizado por uma significativa erosão enquanto que o segundo encontrava-se em estabilidade e com alguma acreção.

Os erros associados perdem expressão face aos valores das taxas evolutivas, especialmente nos resultados apresentados em relação às taxas de evolução de médio-termo (1958-2007) (Figura 46; Figura 47), na qual foram utilizadas ao menos quatro posições de linha de costa, possibilitando um melhor ajuste da reta de regressão linear.

A utilização do indicador representado pelo limite entre o seco e o molhado é muito influenciada pelas morfologias arenosas litorais, também já identificadas por Pais-Barbosa *et al.* (2007) em um segmento costeiro próximo a área de estudo (área entre Esmoriz e Furadouro). Estas feições são representadas por cúspides e barras transversas que influenciam no posicionamento do limite entre o seco e o molhado. Algumas das barras transversas apresentam-se flexionadas para sul pela ação da deriva litoral, enraizadas à praia baixa. Esta variabilidade do limite seco-molhado pode ser considerada como uma das fontes de erro para os resultados finais das taxas evolutivas. Junta-se a isto, a discussão apresentada no capítulo introdutório sobre a influência das marés. Sendo o troço em estudo mesomareal, a posição do indicador seco-molhado apresenta grande variabilidade ao longo do ciclo de maré, especialmente se o perfil de praia for suave, de baixo declive, como ocorre em alguns setores. Há de igualmente considerar a influência das ondas na posição do limite seco-molhado, especialmente durante condições mais energéticas, no qual uma sobrelevação do nível do mar pode ocorrer e deslocar este limite em direção a terra. Estes erros não puderam ser quantificados pela falta de informação dos dados referentes aos voos de tomadas das fotografias aéreas (data, hora). Como se pode verificar pelos gráficos de variação obtidos, as condicionantes acima referidas afectaram praticamente o indicador seco-molhado só significativamente na comparação 1958-1973 pois a faixa de praia na área de estudo era em geral larga, com baixo declive e com barras e cúspides. Segundo Ferreira

(1993), a linha da água na praia pode variar horizontalmente cinquenta metros devido a variação da maré. Isto pode inserir um erro máximo de 5 m/ano num período de dez anos de análise.

A utilização do indicador seco-molhado mostrou-se eficiente pela facilidade de sua visualização e cartografia (Figura 23). Em todas as coberturas de fotografias aéreas a aplicação deste indicador foi satisfatória, e mesmo com todos os erros envolvidos, foi possível identificar setores em recuo ou avanço da linha de costa. Uma das vantagens do seco-molhado é a possibilidade de seu mapeamento em toda a área de estudo, ao contrário do limite entre a praia e a duna, o qual não pôde ser mapeado nos treze quilômetros mais ao norte devido a sua inexistência ou a dificuldade de visualização nas fotografias aéreas.

Ao analisar os resultados, o limite entre o seco e o molhado parece apresentar uma evolução mais sensível, especialmente quando a escala de tempo é menor. Isto pode ser explicado pela sua resposta mais rápida aos processos costeiros, quando comparada com a resposta do limite praia-duna.

Ao comparar as taxas evolutivas entre os anos 1995-1998 isto é facilmente notado, mas ressalve-se que este curto período foi de variação litoral excepcional devido a temporária alteração nas condições da agitação marítima (Cunha & Dinis, 1998). Enquanto o limite praia-duna indica uma costa com evolução indefinida em alguns setores (Figura 41), o limite seco-molhado destaca células do litoral muito bem definidas (Figura 39), condicionadas essencialmente pelos diversos esporões.

Ao considerar uma escala de tempo maior, como entre os anos 1958-2007 (49 anos), as tendências e taxas evolutivas são muito semelhantes entre os dois indicadores utilizados, e os mesmos setores com erosão ao norte (decrecendo para sul) e ligeira acreção ao sul do Km 26 (Praia de Mira) podem ser notados (Figura 46; Figura 47). Portanto, um estudo de evolução de uma linha de costa com a aplicação de um indicador torna-se mais confiável em dois possíveis cenários. O primeiro seria quando a costa apresenta uma evolução bem definida, seja ela de avanço ou recuo. O segundo seria quando é analisado um período mais largo de tempo, possibilitando assim eliminar as variações de curto prazo e evidenciar as de longo prazo, caso seja este o objetivo do estudo.

5.1.2 A escolha de um indicador

A escolha de o indicador que melhor represente a variabilidade da linha de costa num determinado contexto espaço-temporal se torna importante para a discussão dos

dados. Ao longo desta dissertação, as vantagens e desvantagens da aplicação de um indicador foram apresentadas, pelo que na sua escolha deve se ter em conta as respostas aos processos que sobre eles atuam e que ditam a evolução da linha de costa. A confirmação de campo de que os processos que ocorrem no sector norte da área de estudo são claramente erosivos e já foi praticamente destruído o cordão dunar frontal, optou-se por utilizar os resultados da variação da linha de costa obtidos pelo indicador seco-molhado. Para o setor ao sul da Praia de Mira, onde há a presença bem marcada do cordão dunar e a linha de costa se apresenta em progradação, foram utilizados os resultados obtidos pelo limite praia-duna. Note-se que o setor norte foi progressivamente alvo de intervenções antrópicas (esporões, defesas aderentes, enrocamentos e cordão dunar artificial), enquanto que o setor sul ainda se encontrava a evoluir sem a presença de estruturas de defesa costeira (Figura 8).

5.2 O comportamento evolutivo da linha de costa a sul dos molhes portuários de Aveiro

5.2.1 Evolução da linha de costa entre os anos 1958 - 1970/73

Segundo Teixeira (1994) ocorreu acumulação imediatamente a norte do molhe norte do porto de Aveiro com a sua construção (término em 1958), o que adicionado aos enormes volumes de areias extraídas junto à, explicam a forte erosão no extremo norte da área de estudo, com recuos locais máximos de -9 m/ano (Km 46) a -10 m/ano (Km 43) entre 1958 e 1970/73 da linha seco-molhado nas imediações de Costa Nova do Prado (Figura 50). Esta zona de acumulação apresentou uma capacidade de retenção estimada em $20 \times 10^6 \text{m}^3$ entre os anos 1950 e 1978 (incluindo a praia submersa e os montantes de extração) (Castanho et al 1974 in Cunha & Dinis, 1998). A zona de acreção entre o Km 36 e o Km 40 está relacionada com a presença de um extenso banco arenoso intermareal exposto na fotografia aérea de 1970, o que causou o deslocamento para mar do limite seco-molhado.

A comparação entre as taxas encontradas por Ferreira (1993) para todo o troço costeiro permite verificar que o setor erosivo mais significativo entre os anos 1958 e 1970 se encontra entre Costa Nova do Prado e Vagueira. A comparação direta é dificultada pois o referido autor apresenta taxas médias divididas por setores, que caso foi de -6,3 m/ano. Neste presente trabalho a taxa média encontrada entre estas duas povoações foi de 4,6 m/ano.

A frente de erosão costeira que estará, essencialmente, relacionada com a influência do porto de Aveiro durante este período estendeu-se até o Km 28 (Praia de Mira) (Figura 50) ou mesmo até Km 22 pois existe uma zona de transição entre erosão e acreção. Após esta

área de transição a costa evidenciou acreção, com um valor médio de cerca de +2 m/ano. Assim, este troço em acreção ainda não sofria com o défice sedimentar causado pelas intervenções portuárias de Aveiro. Ferreira (1993) apresentou valores de acreção que não superaram +1 m/ano, o que pode ser explicado pelo fato do autor ter trabalhado com a média das taxas evolutivas, subestimando as evoluções pontuais ao longo dos setores costeiros. Neste presente trabalho a média das taxas evolutivas para este setor em acreção (entre o sul de Praia de Mira e norte de Quiaios) foi de +0,9 m/ano, o que entra em concordância com o valor encontrado por Ferreira (1993). Os dois quilómetros ao sul do molhe sul de Aveiro não apresentaram uma evolução clara, e possivelmente está relacionada com uma dinâmica sedimentar mais complexa que ocorre por “refracção” e efeito de “sombra” induzidos pelo molhe sul.

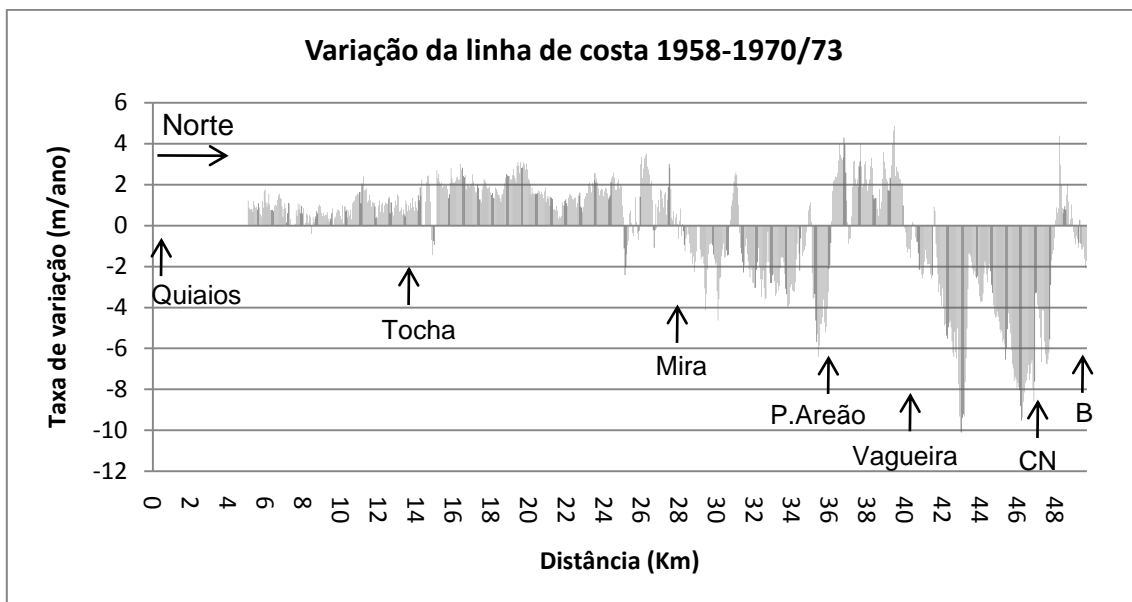


Figura 50: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1958 e 1970/73. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro).

5.2.2 Evolução da linha de costa entre os anos 1970/73 – 1995

Durante este período muitas intervenções foram realizadas com a intenção de retardar ou impedir localmente o recuo da linha de costa, já notado desde a construção dos molhes portuários de Aveiro em 1958. Destas intervenções destacam-se o campo de esporões instalado entre 1972 e 1984 nos arredores das povoações de Barra de Aveiro e Vagueira, e as campanhas de alimentação artificial destas praias com areias das dragagens realizadas ao norte do molhe norte e na própria barra. Contudo, a maioria da areia continuamente retida imediatamente a norte do molhe norte foi extraída e vendida, retirando-se da deriva litoral. Simultaneamente as obras de defesa costeira levaram a uma crescente

urbanização litoral. Os altos valores de recuo, que já se notavam no período 1958 – 1970/73, continuaram e um valor local máximo de -9 m/ano ocorreu ao Km 45 (Figura 51), demonstrando o efeito negativo do campo de esporões citado, o qual intensificou a erosão a sul (sotamar). A erosão obrigou a instalação de um esporão e um enrocamento longilitoral na Vagueira, colocados antes de 1984 (Veloso-Gomes, 2004). Contudo, estas obras na Vagueira provocaram um enorme recuo erosivo imediatamente a sul, atingindo cerca de -6 m/ano no período 1970/73 – 1995.

Durante o período em análise, o litoral em erosão estendeu-se para sul até ao Km 25 (um pouco a sul da Praia de Mira) levando à colocação de dois esporões imediatamente a sul desta povoação durante a década de 80 (Dias, 1994). Para os setores mais ao norte durante o período entre 1970 e 1990, Ferreira (1993) encontrou uma taxa máxima de recuo de 3,9 m/ano (setor Vagueira – Praia do Areão). Valor em concordância com uma taxa média de -4 m/ano para o período entre 1970 e 1995 encontrados para este mesmo setor em questão aqui neste trabalho (Figura 51). Mais para sul, entre o Km 25 e o Km 9, verificou-se algum avanço costeiro com um valor médio rondando +1 m/ano. Contudo, entre o Km 9 e o cabo Mondego verificou-se uma evolução quantitativa similar mas em recuo. Estes valores indicam que, embora o cabo Mondego funcione como um ponto fixo costeiro, a costa baixa e arenosa imediatamente a norte também pode ser significativamente afectada por variações significativas nas condições de agitação marítima, em particular do seu rumo médio num determinado período. Para o setor ao sul de Praia de Mira Ferreira (1993) apresentou taxas médias que classificam-nos como segmentos em estabilidade, variando entre -1,2 e +1,2 m/ano, não sendo notificada a erosão ao norte do cabo Mondego aqui apresentada.

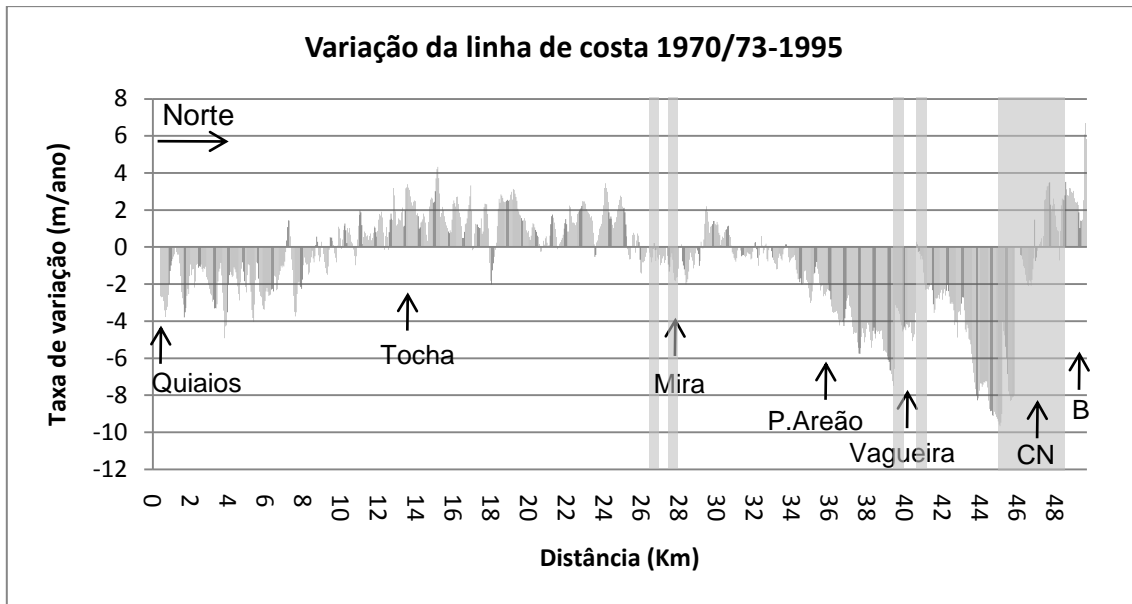


Figura 51: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1970/73 e 1995. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro). As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

5.2.3 Evolução da linha de costa entre os anos 1995 – 1998

A comparação entre os anos 1995 e 1998, evidenciou que o recuo da linha de costa propagou-se rapidamente para sul, só atingindo um sector em equilíbrio dinâmico nos oito quilómetros a norte de Quiaios (Figura 52). No sector que de norte atinge o Km 22 as taxas de recuo foram muito elevadas, com um valor médio estimado em cerca de -10 m/ano e máximos locais > -30 m/ano (ex. -37 m/ano ao sul dos esporões de Costa Nova do Prado) (Figura 52). Boto *et al.* (1997 in Cunha & Dinis, 1998) calcularam que entre Vagueira e Praia do Areão no período de Fevereiro de 1996 e Abril de 1997 a costa recuou com uma taxa média de 9,6 m/ano. Ressalta-se também a erosão costeira verificada nos quatro quilómetros a sul da Praia de Mira, invertendo a anterior tendência para alguma progradação. Do Km 22 ao Km 8 a erosão costeira ocorreu a uma taxa média estimada em cerca de -5 m/ano mas com máximos locais de cerca de -24 m/ano junto a Palheiros de Tocha. Do Km 8 ao Km 0 a costa mostrou tendência para regressão.

A análise cobre somente quatro anos, coincidindo com um período em que, para além de ter ocorrido um forte temporal em Janeiro de 1996, registaram-se ondulações com rumos mais significativos de sudoeste, em detrimento das ondulações frequentes de noroeste, o que determinou uma rotação da ondulação média para oeste (Cunha e Dinis, 1998). Os mesmos autores ainda relataram que os anos entre 1996 e 1998 se caracterizaram por períodos mais húmidos, relacionados com um deslocamento do anticiclone dos Açores da sua posição típica, facilitando a entrada de superfícies frontais

(Cunha e Dinis, 1998). Portanto, a agitação marítima associada a estas condições pode ser a explicação para o cenário com carácter mais erosivo que ocorreu na área de estudo entre os anos 1995 e 1998, com menor deriva litoral para sul mas pouca transposição para sul do cabo Mondego, o que fez crescer a praia no sector de Quiaios.

Possivelmente outros cenários como este acima relatado ocorreram no período entre os anos 1958 e 2007. Porém, estes eventos evolutivos particulares são diluídos numa escala de análise mais larga.

As estruturas de defesa costeira construídas nos litorais adjacentes a núcleos urbanos minimizaram localmente o recuo da costa mas transferiram o deficit sedimentar (e a consequente erosão) para as áreas adjacentes, principalmente para sotamar da deriva dominante (em geral para sul).

As estruturas de defesa costeira construídas até 1998 nas áreas adjacentes às povoações seccionaram o litoral e reduziram a regressão da linha de costa, porém não impediram a intensa erosão, especialmente nos setores ao norte (taxas frequentemente superiores a -25 m/ano). As taxas regressivas foram tão expressivas entre Praia de Mira e Vagueira que levaram a construção de mais dois esporões ao sul desta última povoação nos anos seguintes a 1998.

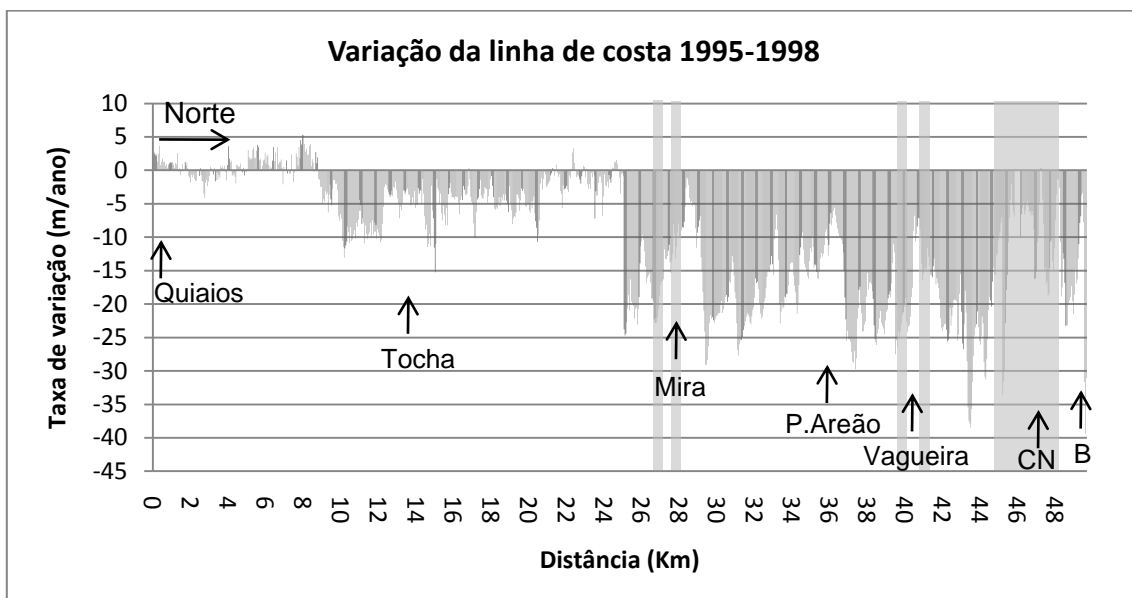


Figura 52: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1995 e 1998. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro). As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

5.2.4 Evolução da linha de costa entre os anos 1998 – 2007

A análise do período 1998 – 2007 demonstra que o retorno às condições de agitação marítima habituais (predominante rumo de WNW), relativamente ao limite seco-molhado, fez decrescer as taxas de erosão costeira (Figura 53).

Para o setor mais ao norte, nos últimos dez quilómetros (até ao Km 40), a linha de costa demonstrou um carácter progradante, com valores que ultrapassaram os +10 m/ano. Este setor é aquele que possui frentes urbanas mais desenvolvidas (Vagueira, Costa Nova do Prado e Barra de Aveiro), o que levou a uma maior artificialização da costa e um grande esforço para conter a forte erosão já notada desde o fim dos anos cinquenta após o término da construção dos molhes portuários.

Do Km 42 ao Km 24 (Vagueira à Praia de Mira) a linha de costa apresentou uma tendência fracamente erosiva mas com uma geometria condicionada pela existência de esporões, que definem uma costa serrilhada com um sector mais erosivo a sul (entre -3 m/ano e -7 m/ano), e outro mais progradante imediatamente a norte de cada esporão (entre +3 m/ano e +6 m/ano).

Os primeiros vinte e quatro quilómetros de linha de costa (entre Quiaios e Praia de Mira), sem a presença de estruturas de defesa e fora da influência direta dos molhes portuários de Aveiro, demonstraram uma evolução progradante. Esta progradação que alcançou um valor cerca de +6 m/ano nos arredores de Palheiros de Tocha, confirma a tendência de um litoral em acreção já notada nos outros períodos anteriores.

O segmento ao norte do cabo Mondego pode ser considerado um litoral em estabilidade entre os anos 1998 e 2007, com uma fraca tendência para a erosão, com um valor pontual máximo de -0.6 m/ano. Isto pode ser explicado por uma saturação sedimentar ao norte do cabo, e esta área funcionava apenas como um corredor para a deriva litoral para sul através do cabo Mondego.

O comportamento da linha de costa permite interpretar que a onda de erosão litoral que se tem propagado de norte devido ao défice sedimentar ainda não atingiu o cabo Mondego. Quando isso acontecer, a costa a sul deste (Teimoso-Figueira da Foz) entrará em processo erosivo de médio termo (plurianual), tal como previsto por Cunha & Dinis (1998). Contudo, com o crescimento da praia devido ao recente prolongamento do molhe norte do porto da Figueira da Foz, tal efeito ficará atenuado nesta baía mas terá efeitos muito graves na costa a sul da foz do Mondego.

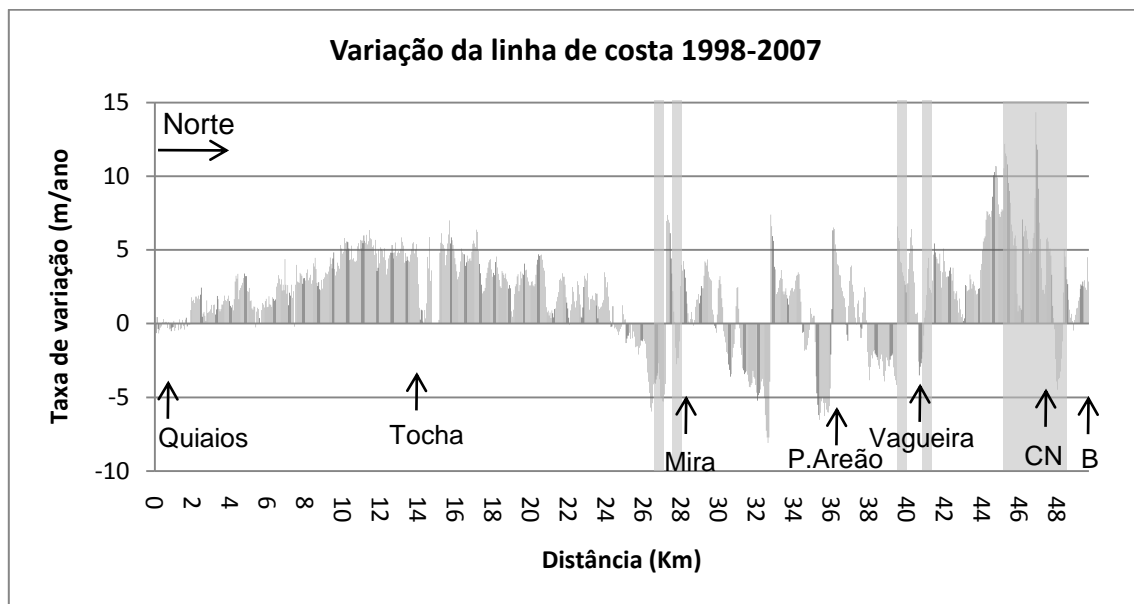


Figura 53: Taxa de variação (m/ano) da posição da linha de costa entre 1998 e 2007. Estão indicadas as povoações ao longo da área de estudo (CN: Costa Nova do Prado; B: Barra de Aveiro). As barras transparentes representam as posições dos esporões (fora de escala).

5.2.5 Evolução da Linha de Costa – Variabilidade Recente (1995 a 2007) versus Variabilidade de médio-termo (1958 a 2007)

A análise da variabilidade recente e de médio-termo da linha de costa, bem como sua comparação permite identificar células litorais cujas evoluções são bem marcadas (Figura 54).

Nos primeiros vinte e cinco quilómetros de costa (primeira metade da área de estudo) se verifica uma costa em acreção. Este primeiro segmento é delimitado ao sul pelo cabo Mondego e a norte pelos esporões de Praia de Mira. Os maiores valores das taxas evolutivas de médio-termo (1958-2007) são encontrados nos arredores de Palheiros de Tocha. As taxas evolutivas entre os anos 1958 e 2007 alcançaram os +2 m/ano ao norte desta povoação. Este setor da costa em acreção também foi registado na evolução recente, com um valor máximo de +4 m/ano. Note-se que a progradação reflete um balanço sedimentar positivo, que nas últimas décadas tem sido compensado pelo abastecimento arenoso proveniente das praias em erosão entre a Praia de Mira e Barra de Aveiro. No extremo sul, junto a Quiaios, existe tendência para uma costa em estabilidade e a progradação provavelmente não ocorre devido à transposição dos sedimentos para sul do cabo, por deriva litoral face às condições de agitação marítima e ao caudal sólido em trânsito.

Os vinte e cinco quilómetros mais a norte, localizados entre Praia de Mira e Barra de Aveiro (Figura 54) apresentam uma evolução claramente distinta do segmento ao sul. A variabilidade recente e de médio-termo indicam um comportamento erosivo e compartimentado pela influência dos esporões. A evolução de médio-termo demonstra um aumento progressivo da erosão entre Praia de Mira (-2 m/ano) e o sul de Costa Nova do Prado (-6,5 m/ano). A evolução entre os quilómetros 25 e 44 é controlada por seis esporões, os quais tendem a minimizar o recuo local mas reduzem as taxas erosivas a barlamar e acentuam a erosão a sotamar. Na análise de médio-termo, a região que apresenta maior recuo da linha de costa é aquela ao sul de Costa Nova do Prado (-6,5 m/ano).

Os últimos cinco quilómetros entre Costa Nova do Prado e Barra de Aveiro apresentaram redução das taxas erosivas. Este segmento é controlado desde os anos 70 por um campo de cinco esporões e por campanhas de alimentação artificial das praias com dragados da zona de acumulação do molhe norte e das areias do canal de navegação. Estas razões podem explicar esta redução da erosão costeira, e até mesmo uma tendência a acreção em Barra de Aveiro.

A variabilidade recente dos vinte e cinco quilómetros mais a norte é semelhante à variabilidade de médio-termo, porém com valores mais significativos. O recuo da linha de costa a sotamar dos esporões apresenta valores que geralmente atingem -8 m/ano. A maior ocorreu entre Praia de Areão e Praia de Mira, com aproximadamente -10 m/ano. As taxas a barlamar dos esporões apresentam valores entre os +1 e +4 m/ano. O troço artificializado entre os quilómetros 44 e 48 apresentou acreção significativa, que também pode ser explicada pela alimentação artificial das praias.

Os valores mais significativos da variabilidade recente em comparação com os da variabilidade de médio-termo permitem perceber que a erosão continuou de forma intensa nos últimos anos. As intervenções realizadas pelo homem para reduzir esta erosão, nomeadamente junto às povoações costeiras, foram críticas para reduzir a vulnerabilidade das mesmas. Porém, esta redução da vulnerabilidade se deu às custas de um maior recuo da linha de costa a sotamar dos esporões. A influência dos molhes portuários provoca um arco de erosão que se estende aproximadamente por 23 Km para sul dos mesmos, com uma frente de erosão que veio a se prolongar ao longo dos anos, atualmente encontrando-se nos arredores de Praia de Mira.

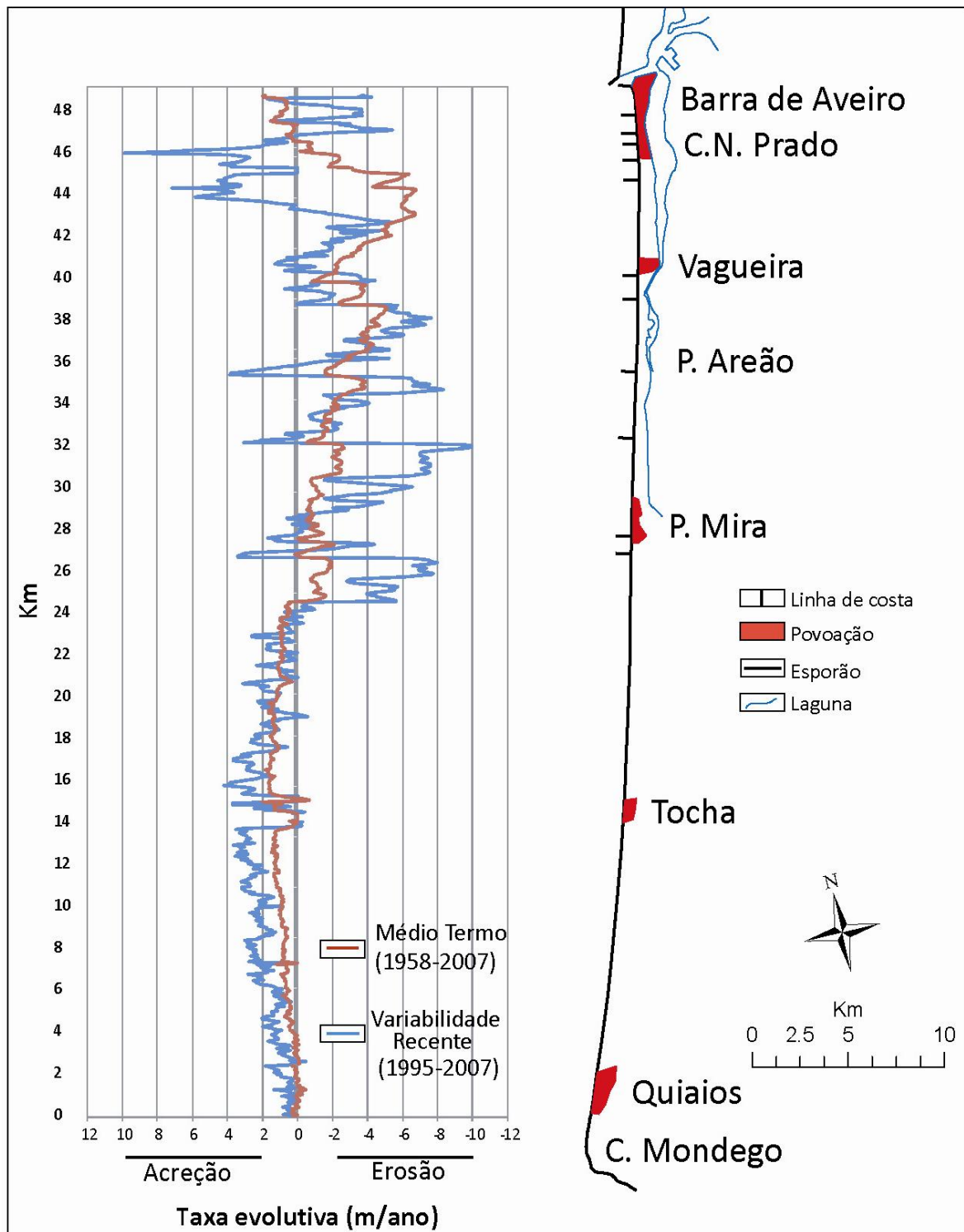


Figura 54: Variabilidade de médio termo (1958-2007) e variabilidade recente (1995-2007) da posição da linha de costa, indicando as diferentes taxas evolutivas (acrecionárias ou erosivas) ao longo da área de estudo. As taxas evolutivas (m/ano) apresentadas são derivadas de uma regressão linear simples entre a posição das linhas de costa disponíveis. Para a evolução de médio termo foram utilizadas as linhas de costa referentes aos anos 1958, 1970/73, 1977, 1995, 1998, 2007 e 2010. As linhas de costa de 1977 e 2010 não abrangem todo o segmento costeiro, mas foram incluídas para o melhor ajuste da reta de regressão linear. As linhas de costa utilizadas para os cálculos das taxas da variabilidade recente são referentes aos anos 1995, 1998, 2007 e 2010.

Capítulo VI - Conclusões

A faixa litoral entre o cabo Mondego e os molhes do porto de Aveiro constitui aproximadamente cinquenta quilómetros de linha de costa com setores de evolução particulares entre os anos de 1958 e 2010.

A utilização de coberturas de fotografias aéreas (1958, 1970, 1973, 1977, 1995, 1998, 2007) e de um RTK-GPS equipado a um veículo todo-terreno (2010) possibilitaram a cartografia de linhas de costa ao longo de toda a área. As linhas de costa foram cartografadas com base em dois indicadores comumente utilizados em outros trabalhos: o limite entre a areia seca e a areia molhada, e o contato entre a praia alta e a vegetação do cordão dunar frontal. O indicador seco-molhado mostrou-se eficaz para a análise da evolução da linha de costa em setores erosivos e sua identificação foi facilitada pelo claro contraste entre a areia seca e a areia molhada nas fotografias aéreas. O indicador praia-duna, por se tratar de um limite mais estável, apresentou uma mobilidade essencialmente controlada pelos eventuais ataques das ondas na base das dunas, pelo fornecimento de areias oriundas da praia e pela capacidade de fixação da vegetação dunar. O limite praia-duna apresentou taxas evolutivas menores que as registradas para o limite seco-molhado, porém também evidenciou os mesmos setores costeiros em acreção e em erosão. O cordão dunar frontal nos 15 Km ao sul dos molhes portuários de Aveiro apresentava-se degradado ou era mesmo inexistente para as coberturas fotográficas mais recentes (a partir de 1995). Isto não possibilitou a cartografia deste limite para esta área mais ao norte, e excluiu a possibilidade da utilização do indicador praia-duna para toda a área de estudo. A discussão sobre a capacidade de representação da evolução da linha de costa por cada um destes indicadores foi apresentada, tendo como conclusão a aplicação do limite praia-duna para a metade sul da área de estudo, e do limite seco-molhado para a metade norte.

Entre o período entre 1958 e 1970 a linha de costa entre Barra de Aveiro e Costa Nova do Prado apresentou recuos superiores a -8 m/ano. A evolução da linha de costa na área de estudo ressalta a influência dos molhes portuários de Aveiro. Com o fim da construção destas estruturas no ano de 1958, o molhe norte passou a funcionar como uma barreira para as areias transportadas para sul, relacionada com os recuos verificados. Uma continuada erosão, culminou na construção de estruturas de defesa costeira na década de 70 (esporões, defesa aderente, enrocamentos), pelo que ali estavam instaladas povoações mesmo antes da construção dos molhes (Barra de Aveiro e Costa Nova do Prado). Entre 1958 e 1995, um arco de erosão se prolongava aproximadamente para sul até Praia de Mira (~25 Km para sul dos molhes portuários), com taxas de recuo gradativamente menores.

Dentre as intervenções para reduzir a denotada erosão, destaca-se a construção de dois esporões em Vagueira da no fim dos anos 90 (~9 Km a sul dos molhes) e os dois esporões e um enrocamento longilitoral na Praia de Mira construídos na década de 80 (~20 Km a sul dos molhes). Estas estruturas condicionaram a evolução local já que a costa foi compartimentada, verificando-se redução da erosão próximo às povoações, e até mesmo uma acreção a barlamar do esporão norte de Praia de Mira no período entre 1973 e 1995.

O curto período de análise entre os anos 1995 e 1998 evidencia os recuos ao norte, que se prolonga até o sul de Praia de Tocha (~42 Km a sul dos molhes). Este comportamento da linha de costa contrasta com os outros períodos analisados por apresentar erosão em setores da costa que antes eram acrecionários. Isto pode estar relacionado com um período em que os rumos das ondulações rotacionaram para oeste e acentuaram a erosão em quase toda a área de estudo.

O período entre 1998 e 2007 confirmou a tendência geral de evolução já verificada antes, possibilitando inferir numa divisão do troço cabo Mondego – Aveiro em setores segundo suas respostas evolutivas. Um setor mais ao norte (entre Barra de Aveiro e Vagueira) é caracterizado por uma linha de costa mais estável e com tendência a acreção com uma média aproximadamente de +2 m/ano. Esta pode estar relacionada com a maior atenção e intervenções realizadas neste segmento litoral devido a presença de povoações mais densas (Barra de Aveiro e Costa Nova do Prado). Um setor ao sul destas povoações definiu uma costa serrilhada, essencialmente controlada pelos esporões ali construídos onde ocorre recuo a sotamar e avanço a barlamar (com taxas entre -7 m/ano e +3 m/ano respectivamente). Para o setor entre o sul de Praia de Mira e norte de Quiaios novamente foram verificadas taxas positivas, com uma acreção máxima em Palheiros de Tocha de aproximadamente +6 m/ano.

As taxas evolutivas calculadas com as linhas de costa referentes aos anos 1958, 1970, 1973, 1995, 1998, 2007 e 2010 permitiram também um estudo do comportamento do litoral a médio (1958-2010) e a curto termo (1995-2010). Estas taxas confirmam o arco de erosão causado pelo déficit sedimentar a sul dos molhes, com uma extensão de 25 Km (entre os molhes e Praia de Mira). Ao sul do citado arco se inicia um setor (de Praia de Mira a Quiaios) cujo avanço da linha de costa permite concluir que esta área ainda não sofre a influência negativa verificada nas praias ao norte. Mais ainda, as praias ao sul podem ser beneficiadas das areias erodidas das praias ao norte, as quais contribuem para um transporte sólido que favorece a acreção entre Praia de Mira e Quiaios.

Referências

- Addo, K.A., Walkden, M., and Mills, J.P., 2008. Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana: *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 63, p. 543-558.
- Almeida, A.C., 1995. Dunas de Quiaios, Gândara e Serra da Boa Viagem. Uma abordagem ecológica da paisagem. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Coimbra.
- André, J.N., 1996. Morfologia litoral da área compreendida entre o Cabo Mondego e S. Pedro de Moel. Tese de Mestrado, Univ. Coimbra, 164 p.
- André, J.N., Cunha, P.P., Dinis, J., Dinis, P. e Cordeiro, F., 2009. Características geomorfológicas e interpretação da evolução do campo dunar eólico na zona costeira entre a Figueira da Foz e a Nazaré: *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, v. VI, p. 39-44.
- Anfuso, G., Pranzini, E. e Vitale, G., 2011. An integrated approach to coastal erosion problems in northern Tuscany (Italy): Littoral morphological evolution and cell distribution: *Geomorphology*, v. 129, p. 204-214.
- Boak, E.H., and Turner, I.L., 2005. Shoreline definition and detection: A review: *Journal of Coastal Research*, v. 21, p. 688-703.
- Cabral, J. & Ribeiro, A., 1988. Carta Neotectónica de Portugal Continental. Lisboa: Serv. Geol. Portugal.
- Camfield, F.E. e Morang, A., 1996. Defining and interpreting shoreline change: *Ocean & Coastal Management*, v. 32, p. 129-151.
- Castilho, A.M., 2008. Lagoas de Quiaios. Contribuição para o seu conhecimento geológico e hidrogeológico. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Coimbra.
- Castilho, A.M., Dinis, P., Marques da Silva, M. , 2010. Hidroestratigrafia da região meridional do sistema aquífero Quaternário de Aveiro. Perfil realizado a norte de Quiaios (Centro de Portugal): VIII Congresso Nacional de Geologia.
- Clarke, M.L. e Rendell, H.M., 2006. Effects of storminess, sand supply and the North Atlantic Oscillation on sand invasion and coastal dune accretion in western Portugal: *Holocene*, v. 16, p. 341-355.
- Corrochano, A., Galera, M., Barba, P., Bernardes, C.A., 1997. Facies y evolución Holocena Reciente en el canal mareal de Mira (Portugal), *Rev. Soc. Geol. España*, p. 123-135.
- Costa, M., 1994. Agitação Marítima na costa Portuguesa: *Anais do Instituto Hidrográfico* n.º 13, p. 35 - 40.
- Crowell, M., Leatherman, S.P., and Buckley, M.K., 1991. Historical Shoreline Change - Error Analysis and Mapping Accuracy: *Journal of Coastal Research*, v. 7, p. 839-852.
- Cunha, P. e Dinis, J., 1998. A erosão nas praias do Cabo Mondego à Figueira da Foz (Portugal centro-oeste), de 1995 a 1998.: *Territoriun*, Revista de Geografia Física aplicada no ordenamento do território e gestão de riscos naturais. Editora Minerva, Coimbra, 5, p. 31-50.
- Danielsen, R., 2008a. Palaeoecological development of the Quiaios-Mira dunes, northern-central littoral Portugal: *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 152, p. 74.

- Danielsen, R., Castilho, A.M., Callapez, P., 2008b. Evolução da paisagem a Norte do Cabo Mondego durante os últimos milhares de anos. In F. C. Lopes & P. M. Callapez (Eds.), *Por Terras da Figueira*: 45-53. Figueira da Foz: Kiwanis Club.
- Danielsen, R., 2009. Late Holocene Environmental Change at the Quiaios-Tocha coastal plain. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.
- Dias, J.M.A., 1987. Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental setentrional portuguesa. Tese de doutoramento.
- Dias, J.M.A., Boski, T., Rodrigues, A. e Magalhaes, F., 2000. Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present - a synthesis: *Marine Geology*, v. 170, p. 177-186.
- Dinis, P.A., 2004. Evolução Pliocénica e Quaternária do Vale do Cértima. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Ferraz, M.D.M., 2007. Identificação e caracterização das dunas e campos dunares da parte norte da península de Tróia. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- Ferreira, Ó. e Dias, J.M.A., 1992. Dune erosion and shoreline retreat between Aveiro and Cape Mondego (Portugal): prediction of future evolution, *International Coastal Congress: Kiel*, p. 187-200.
- Ferreira, O., 1993. Caracterização dos principais factores condicionantes do balanço sedimentar e da evolução da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- Ferreira, O., 1998. Morfodinâmica de praias expostas : Aplicação ao sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego. Tese de Doutoramento, Universidade do Algarve.
- Hanslow, D.J., 2007. Beach Erosion Trend Measurement: A Comparison of Trend Indicators: *Journal of Coastal Research*, special issue 50, p. 588 - 593.
- Harley, M.D., Turner, I.L., Short, A.D. e Ranasinghe, R., 2011. Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring: *Coastal Engineering*, v. 58, p. 194-205.
- Hesp, P., 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics: *Geomorphology*, v. 48, p. 245-268.
- Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N., Esteves, L.S., Gruber, N.L.S., Toldo, E.E., Tabajara, L.L.C.D. e Clerot, L.C.P., 2005. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Iramandai barrier system, Southern Brazil: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 77, p. 493-508.
- Komar, P.D., 1998. *Beach processes and sedimentation*, Prentice Hall, New Jersey, 544 p.
- Lorenzo MN, Ramos AM, Taboada JJ, Gimeno L., 2011. Changes in Present and Future Circulation Types Frequency in Northwest Iberian Peninsula. *PLoS ONE* 6(1): e16201. doi:10.1371/journal.pone.0016201
- MAOT (Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território), 2010. Relatório de Diagnóstico e Fundamentação Técnica da Proposta de Plano de Ordenamento do Espaço Marítimo. Tomo 1: Estudos de Caracterização.
- Moore, L.J., 2000. Shoreline mapping techniques: *Journal of Coastal Research*, v. 16, p. 111-124.

Referências

- Paillard, M., Prevosto, M., Barstow, S.F. e Soares, C.G., 2000. Field measurements of coastal waves and currents in Portugal and Greece: *Coastal Engineering*, v. 40, p. 285-296.
- Pais-Barbosa, J., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F., 2007. Coastal Features in the Energetic and Mesotidal West Coast of Portugal: *Journal of Coastal Research*, p. 459-463.
- Psuty, N.P., 1992. Spatial variation in costal foredune development. In Carter, R. W. G.; Curtis, T. G. F. & Sheehy - Skeffington, M. J. (Eds.). *Coastal Dunes: Geomorphology, Ecology and Mangment for Conservation*. Rotterdam: A. A. Balkena: 3-13.
- Rodrigues, A. e Dias, J.M.A., 1989. Evolução Pós-Glaciária continental a norte do Cabo Mondego. *Anais do Instituto Hidrográfico*, v. 9, p. 67-74.
- Short, A.D., 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*: New York, John Wiley & Sons, LTD, 379 p.
- Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J. e Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution: *Coastal Engineering*, v. 47, p. 211-235.
- Teixeira, S., 1994. Dinâmica morfosedimentar da Ria de Aveiro (Portugal). Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.
- Thieler, E.R., and Danforth, W.W., 1994. Historical Shoreline Mapping (1) - Improving Techniques and Reducing Positioning Errors: *Journal of Coastal Research*, v. 10, p. 549-563.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, A., 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change, Open-File Report 2008-1278, U.S. Geological Survey
- Vasconcelos, M.V., 2009. Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS. 3º Congresso do Comité Português da URSI, Radiocomunicações da Terra ao Universo, Lisboa 3 e 4 de Novembro de 2009.
- Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F., 2003. Portuguese coastal zones and the new coastal management plans: *Journal of Coastal Conservation*, v. 10, p. 43-52.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., das Neves, L., Pais Barbosa, J., Coelho, C., 2004. Erosion risk levels at the NW Portuguese coast: The Douro mouth - Cape Mondego stretch: *Journal of Coastal Conservation* 10: 43-52, 2004.
- Williams, S.J., Gutierrez, B.T., Titus, J.G., Gill, S.K., Cahoon, D.R., Thieler, E.R., Anderson, K.E., FitzGerald, D., Burkett, V. e Samenow, a.J., 2009. Sea-level rise and its effects on the coast. In: *Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region*. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. [J.G. Titus (coordinating lead author), K.E. Anderson, D.R. Cahoon, D.B. Gesch, S.K. Gill, B.T. Gutierrez, E.R. Thieler, and S.J. Williams (lead authors)]. U.S. Environmental Protection Agency: Washington DC, p. 11-24.